

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Л. Г. Чубриков

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Учебное пособие

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2014

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73
Ч-81

Рецензенты: зав. каф. «Автоматизация технологических процессов и производств» БрГТУ
канд. техн. наук, доц. *О. Н. Прокопеня*;
декан электротехн. фак. ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» канд.
техн. наук, доц. *С. В. Болотов*;
зав. каф. «Электротехника и электроника» ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет» канд. техн. наук, доц. *Ф. М. Трухачев*

Чубриков, Л. Г.
Ч-81 Электротехника, электрические машины и аппараты : учеб. пособие / Л. Г. Чубриков ; М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2014. – 267 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://library.gstu.by/StartEK/>. – Загл. с титул. экрана.
ISBN 978-985-535-237-3.

Рассмотрены электрические цепи, машины и аппараты. Приведены расчеты электрических цепей, методика измерений, даны общие понятия, основные параметры и характеристики электрических машин и аппаратов, представлены задачи для практических занятий по всем разделам изучаемого курса.

Для студентов машиностроительных и металлургических специальностей дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73

ISBN 978-985-535-237-3

© Чубриков Л. Г., 2014
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2014

Оглавление

Предисловие.....	7
Введение.....	9
Основные «вехи» развития электротехники	11
Глава 1. Электрические цепи (общие понятия)	13
1.1. Общие сведения.....	13
1.2. Источники электрической энергии	15
1.2.1. Источники постоянного тока	15
1.2.2. Источники однофазного переменного тока	18
1.3. Приемники электрической энергии.....	20
1.3.1. Общие сведения	20
1.3.2. Цепи постоянного тока.....	23
1.3.3. Цепи переменного тока промышленной частоты.....	24
Глава 2. Электрические измерения (измерение электрических величин)	27
2.1. Значение измерений	27
2.2. Общие сведения.....	28
2.3. Погрешности измерений	28
2.4. Классификация измерительных приборов	30
2.5. Методика измерений.....	32
2.6. Электронный осциллограф.....	36
Глава 3. Электрические цепи постоянного тока	40
3.1. Источники ЭДС	40
3.2. О законах электротехники.....	42
3.3. Расчет электрической цепи с одним источником и одним приемником.....	43
3.4. Расчет электрической цепи с одним источником и тремя последовательно соединенными приемниками	44
3.5. Расчет электрической цепи с одним источником и тремя параллельно соединенными приемниками.....	47
3.6. Расчет электрической цепи со смешанным соединением приемников (последовательно-параллельное соединение)	49
3.7. Расчет цепей с несколькими источниками ЭДС	51
3.8. Расчет сложной цепи методом эквивалентного генератора	54
Глава 4. Электрические цепи однофазного синусоидального тока	59
4.1. Представление синусоидальных ЭДС, токов и напряжений тригонометрическими функциями и графиками	59
4.2. Действующие значения синусоидальных токов, ЭДС, напряжений	62
4.3. Представление синусоидальных токов и напряжений вращающимися векторами	63

4.4. Электрическая цепь с резистивным элементом	64
4.5. Электрическая цепь с идеальной индуктивностью	66
4.6. Электрическая цепь с идеальной емкостью	69
4.7. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-L$	72
4.8. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-C$	75
4.9. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-L-C$	79
4.10. Резонанс напряжений	82
4.11. Электрическая цепь с параллельно соединенными приемниками	84
4.12. Резонанс токов	89
4.13. Расчет сложных цепей с одним источником	91
4.14. Мощность в цепи синусоидального тока	95
4.15. Повышение коэффициента мощности в цепях синусоидального тока	96
Глава 5. Трехфазные цепи	102
5.1. Система трехфазного переменного тока	102
5.2. Простейший трехфазный генератор	103
5.3. Соединение обмоток трехфазного генератора звездой	104
5.4. Способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС	107
5.5. Передача электрической энергии потребителю	109
5.6. Классификация приемников и способы их включения в трехфазную цепь	110
5.7. Соединение приемников звездой	111
5.8. Соединение несимметричных приемников треугольником	115
5.9. Мощность трехфазной цепи	116
5.10. Расчет трехфазных цепей с симметричными приемниками	117
5.11. Расчет трехфазных цепей с несимметричными приемниками	120
Глава 6. Переходные процессы в электрических цепях	123
6.1. Возникновение переходных процессов и законы коммутации	123
6.2. Короткое замыкание в цепи $R-L$	125
6.3. Короткое замыкание в цепи $R-C$	126
6.4. Переходный процесс при размыкании цепи	129
Глава 7. Периодические несинусоидальные ЭДС и токи в электрических цепях	131
7.1. Общие сведения	131
7.2. Причины возникновения периодических несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений	131
7.3. Представление несинусоидальных величин	132

Глава 8. Нелинейные цепи	134
8.1. Общие сведения	134
8.2. Нелинейные элементы, их АВХ и простейшие нелинейные цепи	135
8.3. Графический расчет цепей с нелинейными элементами	138
8.4. Графо-аналитический расчет цепей с нелинейными элементами	139
Глава 9. Электромагнитные цепи	142
9.1. Силовое и индукционное действие магнитного поля	142
9.2. Магнитные цепи	142
9.3. Катушка с ферромагнитным сердечником	143
Глава 10. Трансформаторы	147
10.1. Общие сведения	147
10.2. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора	147
10.3. Внешние характеристики и КПД трансформатора	150
10.4. Типы трансформаторов	152
Глава 11. Машины постоянного тока	159
11.1. Общие сведения	159
11.2. Устройство машины постоянного тока	160
11.3. Режимы работы машин постоянного тока	162
11.4. Преобразование энергии и КПД машин постоянного тока	164
11.5. Способы возбуждения машин постоянного тока	165
11.6. Генератор независимого возбуждения	167
11.7. Генератор параллельного возбуждения	169
11.8. Генератор смешанного возбуждения	171
11.9. Двигатели постоянного тока	172
11.10. Двигатели параллельного и независимого возбуждения	173
11.11. Двигатели последовательного возбуждения	179
Глава 12. Асинхронные двигатели	183
12.1. Общие сведения	183
12.2. Конструкция трехфазного асинхронного двигателя	184
12.3. Вращающееся магнитное поле статора	185
12.4. Принцип действия асинхронного двигателя. Скольжение	186
12.5. ЭДС статора и ротора. Электромагнитный момент	188
12.6. Мощность и КПД асинхронного двигателя	190
12.7. Механическая и рабочие характеристики асинхронного двигателя	191
12.8. Пуск асинхронных двигателей	193
12.9. Торможение асинхронного двигателя	197
12.10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя	198
12.11. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели	200
Глава 13. Синхронные машины	205
13.1. Общие сведения	205
13.2. Принцип действия синхронного генератора	205

13.3. Основные характеристики синхронных генераторов.....	208
13.4. Принцип действия синхронного двигателя.....	210
13.5. Характеристики синхронного двигателя	211
13.6. Пуск синхронного двигателя	213
Глава 14. Основы электропривода	215
14.1. Общие сведения.....	215
14.2. Выбор типа электродвигателей	216
14.3. Аппаратура управления и защиты.....	218
14.4. Обозначения отдельных элементов аппаратуры управления.....	220
14.5. Примеры схем электропривода.....	222
Практические занятия	227
Литература	267

ПРЕДИСЛОВИЕ

Энергия – вот тот Бог, который создал все, что существует в Природе и в Жизни!

В настоящее время из всех видов энергии лидирует электромагнитная энергия, обычно называемая электрическая энергия. Из всей многотысячелетней истории человечества, когда использовались самые различные виды энергии, только в течение последних двух веков электрическая энергия «заявила» о своих приоритетах, о своих возможностях в преобразованиях, передаче на расстояния, использования в самых различных жизненных ситуациях. И за короткий исторический срок получила такое распространение в мире, что даже трудно представить, где сейчас можно обойтись без электрической энергии.

Отсюда вытекает простой вывод, что каждый взрослый гражданин Земли в той или иной мере должен быть информирован о возможностях электрической энергии. А любой выпускник технического вуза любой технической специальности должен достаточно хорошо знать возможности электрической энергии и использовать их в своей практической работе.

В прошлом столетии в нашей стране большое внимание уделялось изучению технической науки электротехники всеми техническими, и не только техническими, специалистами в вузах. И для этого выделялось достаточное количество времени.

В наше время «умопомрачительного» технического прогресса необходимость в изучении электротехники даже возросла, но, увы, количество времени на изучение электротехники специалистами-неэлектриками в два и более раз уменьшилось. Таков результат технического прогресса, так как добавилось много новых технических и информационных разработок в использовании электромагнитной энергии, которые должны знать специалисты всех специальностей. Поэтому потребность в знании электротехники всеми специалистами не только не уменьшилась, а наоборот, значительно увеличилась. Но количество времени на их изучение, как уже указывалось выше, уменьшилось. Более того, правительство планирует переход вузов, в том числе и технических, на четырехгодичное обучение. А это означает, что методику изучения электротехники необходимо приспособить к новым реалиям, так как прежние учебники уже становятся малопригодными и по объему, и по содержанию.

Сейчас принято считать, что техническому специалисту-неэлектрику нет большой необходимости изучать сложные специаль-

ные искусственные методы расчета электрических цепей. Достаточно понимать и уметь рассчитывать простые наиболее часто используемые электрические цепи в электротехнике и электронике. А о сложных электрических цепях достаточно иметь общее представление, которое потом, при необходимости, позволит самостоятельно при помощи электротехнической литературы решать конкретные задачи по использованию электрической энергии. Но простое «кастрирование» существующих учебников не решит эту проблему.

Предлагаемое учебное пособие по электротехнике для неэлектротехнических специальностей, как считает автор, позволит студентам получить необходимые знания по электрическим цепям, машинам и аппаратам для использования их в изучении электронной и микропроцессорной техники, в своей будущей работе на предприятиях, а также для самостоятельного повышения знаний по электротехнике, электронной и информационной технике.

Для лучшего усвоения материала учебного пособия после каждой главы приводятся различные вопросы, позволяющие четче представить и понять содержание каждого параграфа этой главы. Поэтому после изучения материала каждой главы студент должен прочитать вопросы и, используя их, представить в своем воображении содержание каждого параграфа этой главы. А на экзаменах все вопросы используются студентами в виде математических указаний.

В заключение автор выражает сердечную благодарность Марине Владимировне Панченко за ее кропотливый труд по оформлению этого учебного пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Закон сохранения энергии утверждает: «Энергия не исчезает и не возникает из ничего. Она в любом процессе преобразуется из одного вида в другой». Это Основной Закон Природы.

История развития человечества – это история освоения различных видов энергии. В настоящее время человечество освоило и широко использует самый удобный вид энергии – электромагнитную (часто ее называют электрической) энергию. Сейчас невозможно назвать область человеческой жизнедеятельности, где бы ни была использована в той или иной форме электрическая энергия.

А почему электрическая энергия получила такое широчайшее распространение?

Во-первых, ее можно получать из любых видов другой энергии.

Во-вторых, она легко передается на большие расстояния при небольших потерях.

В-третьих, она универсальна – легко преобразуется в другие виды энергии.

В-четвертых, она легко распределяется по любым приемникам энергии.

И наконец, она удобна в применении и недорога.

Поэтому не случайно появилась и непрерывно, быстро развивается ЭЛЕКТРОТЕХНИКА – наука о техническом (практическом, прикладном) использовании электромагнитных явлений, электрической энергии. Эту науку должны знать не только специалисты, но и, в той или иной мере, все граждане страны, чтобы правильно и выгодно использовать электрическую энергию.

Но вернемся к нашим специалистам, которых мы готовим для промышленности. Со специалистами электротехнических специальностей все понятно. Электротехника – это их специальность, и они должны, они обязаны знать ее досконально, чтобы с успехом ее использовать в промышленности, на транспорте, в быту. Таково требование их специальности, таково требование их работы!

Специалисты неэлектротехнических специальностей как будто непосредственно не связаны с электротехникой. На самом деле вся их работа, все их промышленные устройства, станки, сварочные агрегаты, прокатные станы, рольганги и т. д. имеют приводы, управляющие «органы», другие информационные устройства, работающие на электрической энергии.

Таким образом, можно утверждать, что и специалисты неэлектротехнических специальностей обязаны знать электротехнику в необходимых для них пределах. Эти пределы в каждом конкретном случае могут быть различны, но есть минимальные пределы, которые абсолютно необходимы для каждого специалиста-неэлектрика. Вот этот минимум они и должны получить в вузе. А уже в процессе своей конкретной работы после окончания вуза обязательно появится необходимость повысить уже конкретно необходимые знания по электротехнике, которые он, специалист-неэлектрик, должен самостоятельно изучить. И если он получил в вузе хорошую основу по электротехнике, то он без особых трудностей справится с такой задачей. Ну а если он в вузе изучал электротехнику ради оценки на экзамене, и пусть даже ради хорошей оценки, ему будет очень трудно справиться с этой задачей – применить электротехнику в новом технологическом процессе, в управлении процессом.

Следовательно, любой специалист, которому предстоит в будущем использовать электрическую энергию, обязан знать и четко представлять в своем воображении:

1. Что такое электротехника, и какие ее основные закономерности.
2. Какие виды электрической энергии существуют и как они получаются (способы получения).
3. Источники электрической энергии постоянного, переменного, трехфазного тока, и как они преобразуют неэлектрическую энергию в электрическую.
4. Приемники электрической энергии, которые преобразуют электрическую энергию в другой вид энергии, совершая при этом необходимую для пользователя работу.
5. Классификация всего многообразия существующих конкретных приемников по их электрическим свойствам: резисторы, индуктивности, емкости.
6. Основные параметры и характеристики источников и приемников и их применение при расчетах, выборе и анализе работы источников и приемников.
7. Использование схем замещения реальных электрических цепей при их расчетах и анализе их работы.
8. Знать и уметь производить измерения основных параметров электрических цепей, знать классификацию измерительных приборов, понимать, что такое погрешности измерений и классы точности приборов.

9. Уметь производить измерения основных параметров (величин) электротехники: ЭДС, ток, напряжение, сопротивление (резисторов, индуктивностей, конденсаторов), мощности и другие параметры.

10. Понимать процессы в различных электрических цепях, производить несложные расчеты и анализ этих процессов в цепях с резистивными, индуктивными, емкостными и комбинированными приемниками.

11. Четко представлять принцип действия, схему-конструкцию, работу, основные параметры и характеристики машин постоянного тока, асинхронных двигателей, синхронных машин.

12. Назначение и работу реле, контакторов и других аппаратов. Уметь производить выбор типа электродвигателя, аппаратов управления и защиты.

ОСНОВНЫЕ «ВЕХИ» РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

И в глубокой древности люди наблюдали и исследовали электрические и магнитные явления, и можно с уверенностью сказать, не безрезультатно. Однако систематическое развитие науки об электрических и магнитных явлениях, считается, началось в 1600 г., когда английский физик *У. Гилберт* опубликовал свой труд «О магните, магнитных телах и о большом магните Земли», где впервые последовательно рассмотрел магнитные и многие электрические явления.

И только в 1800 г. *А. Вольта* (Италия) создал химический источник – вольтовый столб, открыл контактную разность потенциалов.

В. В. Петров (Россия) в 1802 г. исследовал электрическую дугу, электропроводность, электрические явления в газах, установил возможность применения дуги для освещения, для плавки и сварки металлов.

М. Фарадей (Англия) исследовал химическое действие электрического поля, обнаружил взаимосвязь между электричеством и магнетизмом, между магнетизмом и светом. В 1831 г. открыл электромагнитную индукцию – явление, которое легло в основу электротехники. В 1833–1834 гг. установил законы электролиза. Ввел понятия электрического и магнитного поля, высказал идею существования электромагнитных волн.

Д. Джоуль (Англия) открыл, а *Э. Ленц* (Россия) обосновал в 1833 г. закон Джоуля–Ленца.

А. Ампер (Франция) в 1830 г. открыл механические взаимодействия токов и установил закон Ампера.

Г. Ом (Германия) в 1826 г. открыл закон Ома.

Г. Кирхгоф (Германия) установил законы Кирхгофа для электрической цепи (1847).

Д. Максвелл (Англия) создал теорию электромагнитного поля.

Х. Эрстед (Дания) в 1820 г. открыл магнитное действие электрического тока.

Б. С. Якоби (Россия) – создал электродвигатель (1834), первый электропривод судна (1838), в 1839 г. открыл гальванопластику, в 1850 г. изобрел первый в мире буквопечатающий аппарат.

З. Грамм (Франция) – в 1870 г. изобрел электромашинный генератор с самовозбуждением.

А. Г. Столетов (Россия) исследовал фотоэлектрические явления и изготовил первый фотоэлемент.

А. Н. Лодыгин (Россия) – 1873 г. – лампа накаливания.

П. Н. Яблочков (Россия) – 1876 г. – дуговая лампа, трансформатор.

Д. А. Лачинов (Россия) – 1880 г. – теория передачи электрической энергии.

М. О. Доливо-Добровольский (Россия), *Н. Тесла* (США) – разработали трехфазные цепи, машины (1880–1890 гг.)

А. С. Попов (Россия) – 1896 г. – радио.

А в настоящее время жизнь землян без использования электрической энергии невозможна.

ГЛАВА 1

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ (ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ)

1.1. Общие сведения

Как уже было сказано во введении, электротехника – это наука о техническом применении (прикладном) электромагнитных явлений, т. е. об использовании электрической энергии в практических целях.

Для использования электрической энергии в промышленных, транспортных, бытовых целях необходимо создавать специальные устройства получения, передачи и применения этой энергии. А для эффективного использования электрической энергии необходимо разрабатывать способы, методы, конструкции различных устройств для конкретных применений.

Устройства, преобразующие неэлектрические виды энергии в электрическую энергию, будем называть источниками электрической энергии. К ним относятся различные химические элементы, аккумуляторы, различные типы генераторов постоянного и переменного тока.

Устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды энергии с целью получения полезного для потребителя эффекта, будем называть приемниками электрической энергии.

Устройства, предназначенные для передачи электрической энергии от источников к приемникам, а также для управления при этом количеством и качеством передаваемой энергии, будем называть устройствами передачи энергии.

Для передачи электрической энергии от источника к приемнику используется электрический ток, для протекания которого создают замкнутую электрическую цепь, состоящую из вышеуказанных устройств.

Таким образом, для наглядности, структуру электрической цепи можно представить в виде блок-схемы, представленной на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Структура электрической цепи

Краткое определение электрической цепи: электрическая цепь – это совокупность электротехнических устройств, соединенных между собой таким образом, чтобы в цепи протекал электрический ток.

А чтобы в цепи протекал электрический ток, необходимо включить в цепь: источник электрической энергии (генератор), приемник электрической энергии («нагрузка»), устройства передачи электрической энергии от источника к приемнику (линии электропередач, повышающие (или понижающие) трансформаторы, включающие и контролирующие устройства и др.).

Отдельные устройства, входящие в цепь, называют элементами цепи.

Часть электрической цепи с выделенными в ней элементами называют участком цепи.

В любой электрической цепи «главным действующим лицом» является источник электрической энергии. В зависимости от того, какую энергию будет генерировать источник, такая получится и электрическая цепь: цепь постоянного тока, цепь однофазного синусоидального тока, цепь трехфазного синусоидального тока, цепь несинусоидального переменного тока и т. п.

Поэтому есть смысл сначала рассмотреть необходимую краткую информацию о существующих источниках электрической энергии и о формах энергии, которую они генерируют. Ведь каждая форма электрической энергии вызывает свои специфические процессы в электрической цепи и в приемниках электрической энергии.

Для обозначения конкретных элементов цепи приняты условные графические обозначения. Для примера некоторые из них приведены на рис. 1.2. Условные обозначения определены ГОСТом.

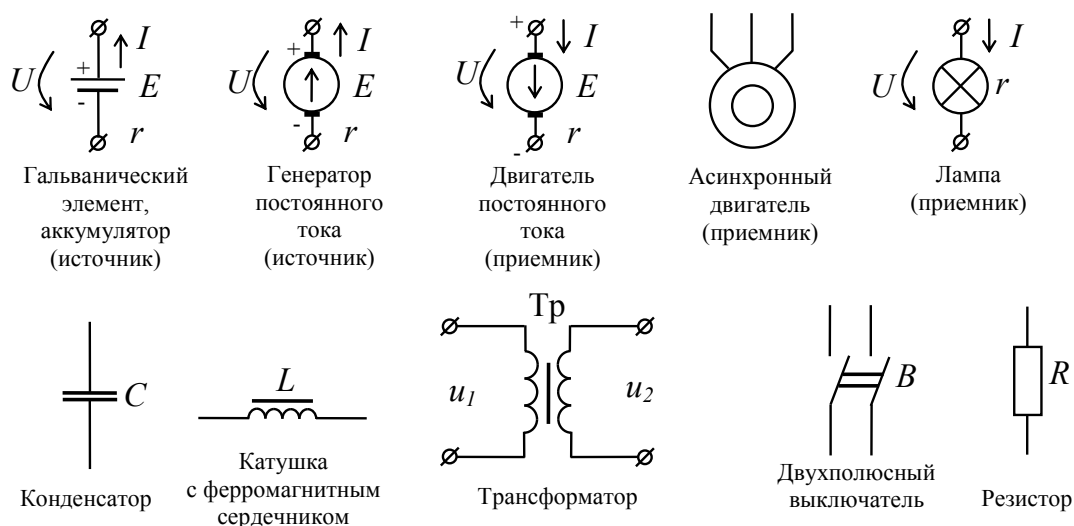


Рис. 1.2. Элементы электрической цепи

1.2. Источники электрической энергии

1.2.1. Источники постоянного тока

Источниками постоянного тока могут быть генераторы, аккумуляторы, гальванические элементы, термопары, фотоэлементы и др. В источниках неэлектрические виды энергии – механическая, химическая, тепловая, лучистая (например, энергия света) – преобразуются в электрическую энергию.

В генераторах постоянного тока механическая энергия вращающегося вала, например, турбины, преобразуется в электрическую энергию постоянного тока (будет рассмотрен в разделе «Машины постоянного тока»).

Гальванические элементы преобразуют химическую энергию в электрическую энергию постоянного тока.

Большое распространение получили марганцово-цинковые элементы, выполненные в виде стаканчика или галетные. Электродвижущая сила элемента $E = 1,5$ В. Емкостью элемента называется количество электричества в ампер-часах ($A \cdot ч$), которое можно получить от элемента за все время его эксплуатации.

Гальванические элементы получили широкое применение и на производстве, и в быту.

Аккумуляторы являются вторичными химическими источниками электрического тока. Это такие источники электрического тока, которые после разряда можно вновь зарядить, т. е. преобразовать электрическую энергию в химическую энергию. А после перезарядки они вновь становятся источниками электрической энергии. Емкость аккумулятора определяется в ампер-часах за время нормального разряда.

Гальванические элементы и аккумуляторы можно соединить последовательно или параллельно. При последовательном соединении ЭДС батареи увеличивается в n раз, т. е. $E_{\Sigma} = nE_0$, где n – число элементов в батарее, а внутреннее сопротивление тоже $r = nr_0$.

При параллельном соединении элементов напряжение батареи равно ЭДС одного элемента $U = U_0$, а максимальный ток потребителя

$I = nI_0$ и внутреннее сопротивление батареи $r_{\text{вн}} = \frac{r_0}{n}$.

В тех случаях, когда требуется увеличить и ЭДС, и ток потребителя, можно использовать групповое соединение – сочетание последовательного и параллельного соединений элементов.

Характеризуют источники чаще всего такими номинальными величинами:

- 1) электродвижущей силой (ЭДС) E , которая равна напряжению на разомкнутых зажимах источника (в режиме холостого хода), т. е. может быть измерена вольтметром;
- 2) номинальным током $I_{\text{ном}}$;
- 3) номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ (при $I_{\text{ном}}$);
- 4) номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$.

Номинальные величины устанавливает изготовитель данного источника.

Подключение к источнику постоянного тока (ИПТ) приемника электрической энергии можно отобразить в виде простейшей схемы, показанной на рис. 1.3.

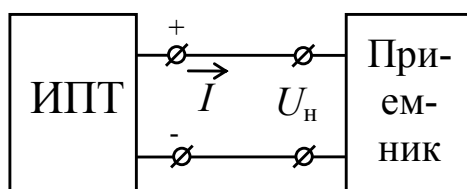


Рис. 1.3. Блок-схема электрической цепи

Однако для анализа и расчета электрических цепей необходимо учитывать внутреннюю структуру источника и приемника. Поэтому используют схемы замещения источников и приемников. На рис. 1.4 приведена схема замещения источника постоянного тока (схему замещения приемника мы рассмотрим позже).

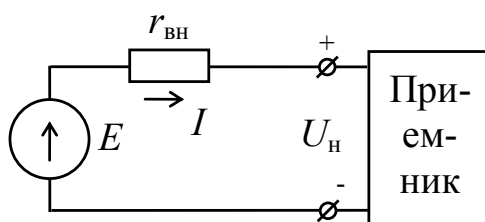


Рис. 1.4. Схема замещения ИПТ

Приемник электрической энергии нагружает источник, и поэтому принято приемник называть *нагрузкой*, а напряжение на входе нагрузки принято называть *напряжением нагрузки* и обозначать $U_{\text{н}}$.

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа по замкнутому контуру протекания тока I :

$$E = Ir_{\text{вн}} + U_{\text{н}}. \quad (1.1)$$

Тогда напряжение на нагрузке

$$U_{\text{н}} = E - Ir_{\text{вн}}. \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) видно, что при отключенной нагрузке, когда ток $I = 0$ (так называемый режим холостого хода), напряжение на зажимах источника

$$U_{\text{н.хх}} = E. \quad (1.3)$$

Следовательно, при помощи вольтметра, у которого сопротивление большое ($r \rightarrow \infty$), можно измерить ЭДС E источника в режиме холостого хода, т. е. при токе $I = 0$, когда сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = \infty$.

Временные диаграммы $E = f(t)$, $I = f(t)$, $U_{\text{н}} = f(t)$ при неизменном сопротивлении приемника $R_{\text{н}} = \text{const}$ приведены на рис. 1.5.

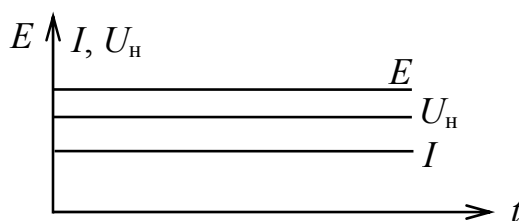


Рис. 1.5. Временные диаграммы

А внешняя характеристика цепи $U_{\text{н}} = f(I)$, согласно уравнению (1.2), линейно зависит от тока $I = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}$ при изменении $R_{\text{н}}$ (рис. 1.6).

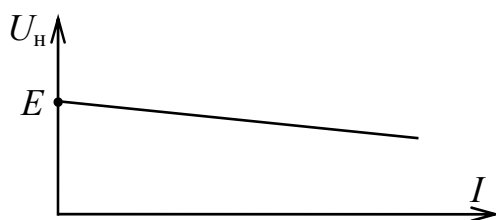


Рис. 1.6. Внешняя характеристика

1.2.2. Источники однофазного переменного тока

Переменный ток – это такой электрический ток, величина которого периодически повторяется через равные промежутки времени, которые принято называть периодом T . В промышленности чаще всего используется синусоидальный ток, получаемый генераторами, преобразующими механическую энергию паровых турбин, гидравлических турбин или двигателей, в электрическую энергию синусоидального тока. Число периодов в секунду называется частотой переменного тока, т. е.

$$f = \frac{1}{T}. \quad (1.4)$$

Единицу измерения частоты принято называть герц (сокращенно Гц).

В Европе и в нашей стране в качестве промышленной частоты принята частота $f = 50$ Гц. В США и Канаде принята $f = 60$ Гц. В электронике используются электронные генераторы, генерирующие синусоидальные электрические колебания частотой тысячи и миллионы герц. Приняты обозначения:

1 килogerц = 1000 Гц ($1 \text{ кГц} = 10^3 \text{ Гц}$);

1 мегагерц = 1000000 Гц ($1 \text{ МГц} = 10^6 \text{ Гц}$).

Рассмотрим принцип получения синусоидальной ЭДС в простейшем промышленном генераторе, например, в системе генератор-двигатель.

На рис. 1.7 показан генератор, состоящий из неподвижного статора и вращающегося ротора. Ротор вращает посторонний двигатель. Статор собирается из пластин листовой электротехнической стали. Каждая пластина изолирована от других для уменьшения нагрева статора от вихревых токов.

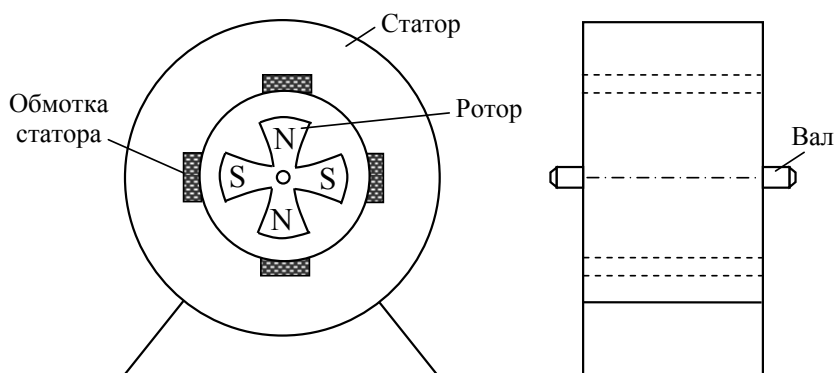


Рис. 1.7. Генератор

В пазах статора уложены обмотки изолированных проводов, соединенные определенным образом и образующие *обмотку* статора.

В этом простейшем генераторе ротор содержит две пары магнитных полюсов ($p = 2$). При вращении ротора магнитное поле полюсов пересекает провода обмотки статора и возбуждает в ней ЭДС. За один оборот ротора в обмотке статора индуцируется два периода синусоидальной ЭДС, т. е. частота ЭДС $f = 2$.

Если увеличить число пар полюсов до величины $p = 50$, то частота ЭДС $f = 50$ Гц. При этом ЭДС, наведенная в обмотке статора магнитным потоком всех пар полюсов, будет

$$e = E_m \sin \omega t, \quad (1.7)$$

где e – мгновенное значение ЭДС; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота (число периодов за один оборот ротора 2π); E_m – амплитуда ЭДС.

На электростанциях используют мощные электромашинные синхронные генераторы, ротор которых вращается от паровой или от гидравлической турбины.

На статоре размещена обмотка, в которой индуцируется ЭДС магнитным полем вращающегося ротора. Для создания вращающегося магнитного поля ротора на нем установлены электромагниты, которые возбуждаются от генератора постоянного тока. Электрический постоянный ток от этого генератора через контактные щетки и контактные кольца поступает в обмотки магнитных полюсов, которые при вращении ротора (якоря) создают вращающееся магнитное поле.

Временные диаграммы синусоидальной ЭДС и тока генератора при неизменном активном сопротивлении приемника приведены на рис. 1.8.

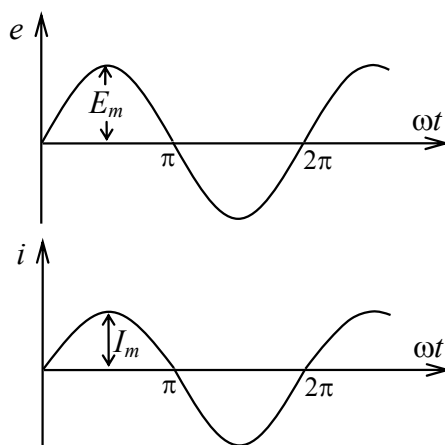


Рис. 1.8. Временные диаграммы ЭДС и тока

Достоинства и области применения синусоидального тока
Достоинства:

1. Экономично можно осуществлять получение, передачу, распределение и использование электрической энергии. Экономично за счет:

а) легко преобразовывать в высокое напряжение и малый ток (для передачи) и *наоборот* (для потребления) при помощи относительно простых и надежных аппаратов – трансформаторов, имеющих высокий КПД;

б) так как у синусоидального тока нет высших гармоник, то потери на вихревые токи минимальны (чем больше частота, тем больше потери). У других переменных несинусоидальных токов потери повышены за счет высших гармоник.

2. При синусоидальных токах сохраняются формы кривых напряжений и токов при прохождении линейных электрических цепей.

3. Сравнительная простота расчета цепей переменного синусоидального тока по сравнению с цепями несинусоидального тока.

Применение:

1. В промышленности 50 Гц: асинхронные и синхронные машины, освещение, нагревательные устройства и т. д.

2. В авиации 400 Гц: при повышенной частоте снижаются габариты и вес электрических устройств.

3. В электротермических установках (500 Гц – 50 МГц).

4. В радиотехнике, связи, автоматике и т. д.

1.3. Приемники электрической энергии

1.3.1. Общие сведения

Электрическая энергия используется для привода в действие великого множества самых различных устройств. Это и электрические двигатели, и электрические лампы, и приборы измерительные, и плавильные печи, и сварка, и релейные элементы, и обогрев помещений, и компьютеры, и многое-многое другое – всего невозможно уже перечислить. И в каждой конкретной специализированной схеме эти все устройства обозначаются какими-то условными обозначениями. И в электротехнических схемах каждое устройство обозначается условными обозначениями.

Но в электрических цепях при расчетах все эти устройства обобщенно называются приемниками электрической энергии, так же, как и

обобщенно называются и различные генераторы – источниками электрической энергии. Это позволяет создать общую теорию электротехники – теорию электрических цепей.

В теории электрических цепей все электротехнические устройства рассматриваются с точки зрения *преобразователей энергии* – как источники, так и приемники электрической энергии.

С этих позиций *все многообразие приемников* можно свести к трем видам: *резисторам, индуктивностям, емкостям*.

В общем случае процессы, протекающие в электрических цепях, разнообразны и взаимосвязаны. Во всех элементах реальной электрической цепи одновременно происходят *необратимые* процессы преобразования электрической энергии в тепло, или в другие виды энергии (чаще – в тепло), а также *взаимные* преобразования энергии электрических и магнитных полей. Поэтому анализ и расчет электрических цепей с учетом всех явлений в каждом элементе цепи оказывается весьма сложным.

Для упрощения анализа и расчета реальную электрическую цепь заменяют схемой замещения, которая состоит из идеальных элементов. В отличие от реального элемента, идеальный элемент всегда характеризуется только одним параметром, который отражает тот или иной один процесс преобразования энергии в электрической цепи.

Для учета *необратимого* процесса поглощения энергии элементом электрической цепи (преобразование электрической энергии в другой вид энергии, чаще в тепло) в схеме замещения используют резистивный элемент (резистор). Его обозначение на схемах показано на рис. 1.9.

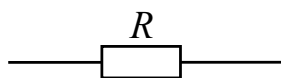


Рис. 1.9. Резистор

В цепях переменного тока повышенной частоты сопротивление резистивного элемента R несколько больше, чем сопротивление постоянному току. Его называют *активным* сопротивлением. При невысоких частотах, тем более на промышленной частоте 50 Гц, эта разница незначительна, и поэтому активное сопротивление резистивного элемента считают равным сопротивлению постоянному току.

Для учета *обратимого* преобразования электрической энергии источника в *энергию магнитного поля* в схеме замещения используют идеальную индуктивность. Ее обозначение приведено на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Идеальная индуктивность

Для учета *обратимого* преобразования электрической энергии источника в *энергию электрического поля* в схеме замещения используют идеальную емкость. Ее обозначение на схеме приведено на рис. 1.11.

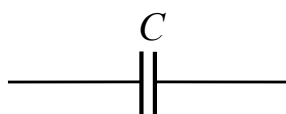


Рис. 1.11. Идеальная емкость

Так как *реальный элемент электрической цепи* характеризуется чаще всего несколькими параметрами, то в схеме замещения он замещается несколькими идеальными элементами. Количество идеальных элементов для одного и того же реального элемента может быть принято различным, в зависимости от условий работы электрической цепи и рода протекающего тока.

Например, сопротивление реальной катушки индуктивности на постоянном токе будет определяться лишь резистором R_k , т. е. сопротивлением провода катушки, так как индуктивность L на постоянном токе, когда $i = I = \text{const}$, не проявляется, т. е. сопротивление $x_L = L \frac{di}{dt} = 0$ при $\frac{di}{dt} \approx 0$ на постоянном токе I .

В цепях невысокой частоты тока, где $x_L \neq 0$, реальная катушка индуктивности будет иметь схему замещения, как показано на рис. 1.12.

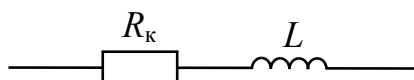


Рис. 1.12. Реальная индуктивность

А на высокой частоте, когда уже проявляются и *межвитковые емкости*, реальная катушка индуктивности будет иметь схему замещения, как показано на рис. 1.13.

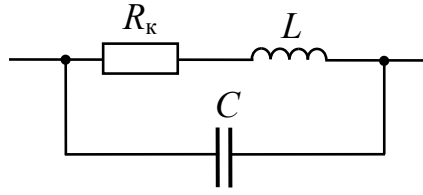
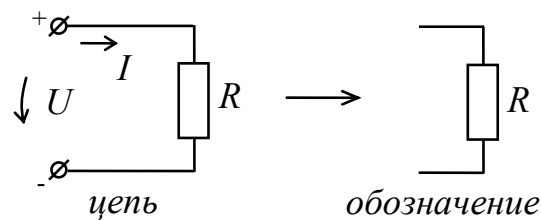


Рис. 1.13. Реальная катушка на высокой частоте

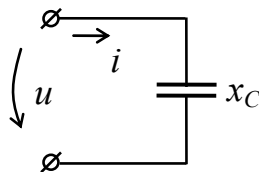
Итак, схемы замещения реальных приемников в электрических цепях электротехнических устройств, работающих на постоянном токе и на переменном синусоидальном и несинусоидальном токе, работающих на повышенных частотах, должны быть различны. Здесь мы будем рассматривать только электрические цепи *постоянного тока и токов промышленной частоты*.

1.3.2. Цепи постоянного тока

1. Сопротивление резистора определяется законом Ома $R = \frac{U}{I}$ Ом.

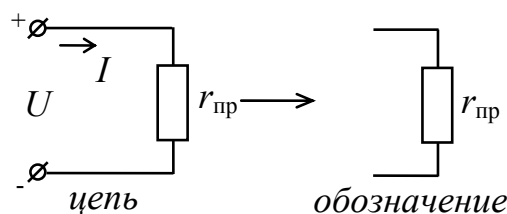


2. Емкость (конденсатор) характеризуется емкостным сопротивлением (*реактивное емкостное сопротивление на переменном токе*) $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ Ом. Но на постоянном токе частота $f = 0$. Следовательно, емкостное сопротивление на постоянном токе будет $X_C = \infty$. При этом, очевидно, ток $I = 0$ («разрыв» цепи).



3. Индуктивная катушка намотана проводом. Следовательно, кроме индуктивного реактивного сопротивления, катушка всегда имеет электрическое сопротивление провода $r_{пр}$. А реактивное индуктивное сопротивление катушки на переменном токе, как известно,

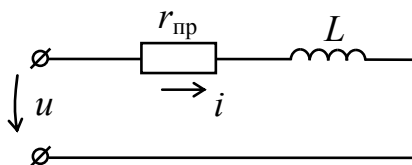
$x_L = \omega L = 2\pi fL$. Но на постоянном токе $f = 0$. Следовательно, на постоянном токе $x_L = 0$, и индуктивная катушка представляет собой для источника постоянного тока почти как короткое замыкание, так как сопротивление провода катушки $r_{пр}$ мало!



1.3.3. Цепи переменного тока промышленной частоты

1. Резистор также определяется законом Ома. Его сопротивление $R = \frac{U}{I}$ Ом.

2. На переменном токе индуктивная катушка в цепи замещается схемой замещения с двумя элементами $r_{пр}$ и $x_L = \omega L = 2\pi fL$ Ом (при $f = 50$ Гц $x_L = 314L$).



3. На переменном токе конденсаторы имеют реактивное емкостное сопротивление $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$ Ом, на промышленной частоте

$$x_C = \frac{1}{2\pi 50C} = \frac{1}{314C} \text{ Ом.}$$

Примечание. Промышленностью выпускаются также и электролитические конденсаторы, имеющие большие емкости при сравнительно малых габаритах. Однако нужно четко себе представлять, что такие конденсаторы можно включать только в цепи *постоянного тока*, или *пульсирующего тока*, не меняющего своего направления. При этом подключать необходимо при соблюдении полярностей, указанных на выводах конденсатора, и полярности источника питания.

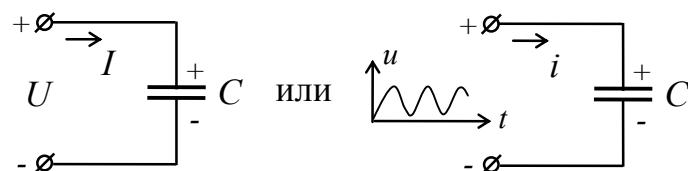


Рис. 1.14. Включение электролитических конденсаторов в электрическую цепь

При неправильном включении электролитического конденсатора в нем происходит бурный химический процесс с выделением газов. Давление газов быстро возрастает, и конденсатор взрывается. Чем больше емкость, тем больше габариты, тем мощнее взрыв.

При последовательном соединении резистора R , индуктивности L и конденсатора C в цепи синусоидального тока, как показано на рис. 1.15, можно определить полное сопротивление цепи (приемника) $Z = \frac{U}{I}$.

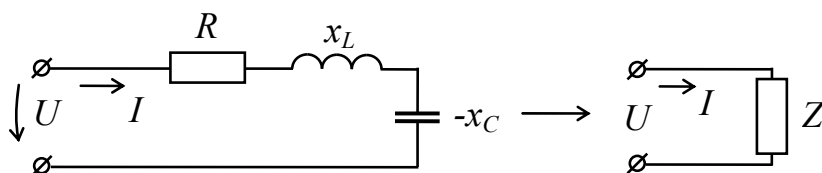


Рис. 1.15. Схема включения элементов R – L – C

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} \text{ Ом.}$$

Вопросы

1.1. Общие понятия

1. Что изучает электротехника как наука?
2. Источники электрической энергии. Их назначение.
3. Приемники электрической энергии. Их назначение.
4. Устройства передачи энергии. Какие функции они выполняют?
5. Что такое электрическая цепь? Ее состав и функции.
6. Элементы электрической энергии.

1.2. Источники электрической энергии

1. Основные параметры источников.
2. Источники постоянного тока. Как получают энергию постоянного тока?

3. Схема замещения источника при подключенной нагрузке (приемника).

4. Источники однофазного переменного тока. Как получают энергию синусоидального тока?

5. Достоинства и применение энергии синусоидального тока.

1.3. Приемники электрической энергии

1. Какие приемники используют в промышленности и в быту?

2. Три вида приемников как преобразователи электрической энергии в тепловую энергию, в энергию электрического поля, в энергию магнитного поля.

3. Что такое схема замещения реальной электрической цепи, из каких идеальных элементов она состоит?

4. Какой процесс преобразования энергии отражает резистор R ?

5. Какой процесс преобразования энергии отражает идеальная индуктивность L ?

6. Какой процесс преобразования энергии отражает идеальная емкость C ?

7. Схема замещения реальной катушки индуктивности.

8. Какова схема замещения реальной электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных источника, катушки и конденсатора?

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

(ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН)

2.1. Значение измерений

Сколько существует человечество, столько существуют задачи измерений. При этом по мере появления новых областей деятельности человека появляются и решаются новые задачи измерений новых величин, новых технических и технологических параметров. А что такое измерение какой-то физической величины? Это сравнение и оценка неизвестного значения определенной физической величины при помощи известного общепринятого значения этой физической величины, единицы измерений, которая имеет свое общепринятое название (грамм, метр, ампер, вольт и т. д.). Для измерений, т. е. для сравнения неизвестных значений физических величин с известными значениями, разработаны и общеприняты специальные эталоны различных физических величин.

Эти измерения, т. е. сравнения неизвестных значений физических величин с эталонами, чаще всего производят при помощи измерительных приборов, разработанных и изготовленных специально для каждой физической величины.

Развитие средств измерений является одной из основных возможностей познания природы, ее явлений и законов, развития техники.

Особенно важную роль в познании природы и развитии электротехники играют электрические измерения, которые позволили за короткий исторический срок с 1800 года развить электротехнику, электронику, микропроцессорную технику до высочайшего уровня. Ведь электрические и магнитные явления и величины не воспринимаются непосредственно нашими органами чувств. Поэтому изучение этих явлений и их количественные определения возможны только при помощи электроизмерительных приборов.

Любая электроустановка, а тем более сложная, может работать нормально, если все ее составляющие элементы – генераторы, приемники и другие элементы электрической цепи удовлетворяют определенным техническим требованиям. А это можно проверить только при помощи измерительных приборов. В современное время во всех сферах человеческой деятельности широко используются электрические установки и электрические измерения и электрических, и неэлектрических величин. Это означает, что электрические измерения

обеспечивают рациональное ведение любых технологических процессов и, следовательно, улучшают технико-экономические показатели работы любого предприятия.

Отсюда вывод – каждый специалист любой специальности должен знать и уметь:

1. Какие существуют электрические измерительные приборы.
2. Выбрать измерительный прибор для измерений нужной величины с необходимой точностью.
3. Правильно включить прибор и произвести измерение.
4. Правильно оценить полученные результаты измерений.

2.2. Общие сведения

Измерение – это процесс сравнения опытным путем измеряемой физической величины с некоторым значением этой физической величины, принятой за единицу. Это сравнение осуществляется при помощи специальных технических средств – электроизмерительных приборов.

Средства электрических измерений применяют не только для получения информации об измеряемой физической величине, но и для осуществления постоянного контроля и управления различными технологическими процессами с помощью микропроцессорных систем. Развитие микропроцессорных систем управления технологическими процессами предъявляет все более жесткие требования к точности и надежности средств электрических измерений и стимулирует дальнейшее развитие средств измерений и телеизмерений.

Мера – это образец, аттестованный метрологическим учреждением, и представляющий собой техническое средство, служащее для вещественного воспроизведения единицы определенной физической величины.

В электрических измерениях используют меры ЭДС, тока, сопротивления, индуктивности, взаимной индуктивности и емкости.

Техническое средство измерений, электроизмерительный прибор – это устройство, с помощью которого вырабатывается сигнал измерительной информации в форме, доступной восприятию человека.

2.3. Погрешности измерений

Показания электроизмерительных приборов всегда несколько отличаются от действительных значений измеряемых величин. Это вы-

звано непостоянством параметров измерительной цепи, несовершенством конструкции измерительных механизмов (наличие трения и т. д.), влиянием внешних факторов (внешние магнитные и электрические поля, изменения температуры окружающей среды, влажности и т. д.).

Для характеристики несоответствия между измеренной и действительной величинами используется понятие погрешностей измерений.

1. Абсолютная погрешность $\pm \Delta A = A_{\text{и}} - A_{\text{д}}$, где $A_{\text{и}}$ – результат измерений, $A_{\text{д}}$ – действительная величина.

2. Относительная погрешность в процентах

$$\gamma = \frac{\pm \Delta A}{A_{\text{д}}} 100 \% = \frac{A_{\text{и}} - A_{\text{д}}}{A_{\text{д}}} 100 \%. \quad (2.1)$$

Однако $A_{\text{д}}$ нам неизвестна. Мы ее пытаемся определить. Следовательно, погрешность измерения по этой формуле определить нельзя. Поэтому ввели понятие приведенной погрешности.

3. Основная *приведенная погрешность* прибора в процентах

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\pm \Delta A}{A_{\text{н}}} 100 \% = \frac{A_{\text{и}} - A_{\text{н}}}{A_{\text{н}}} 100 \%, \quad (2.2)$$

где $A_{\text{н}}$ – номинальная измеряемая величина прибора.

Однако в качестве $A_{\text{н}}$ принимают *максимальное* значение измеряемой величины данным прибором (*предел шкалы прибора*).

Приведенная погрешность прибора $\gamma_{\text{пр}}$ в процентах определяет *класс точности* прибора. Например, класс точности 0,5 имеет $\gamma_{\text{пр}} = \pm 0,5 \%$. Эта погрешность $\gamma_{\text{пр}}$ называется *основной*, так как она гарантирована в нормальных условиях работы прибора: $t^{\circ} = 20^{\circ} \text{C}$ отсутствие внешних магнитных полей, правильное положение прибора и т. д. При других условиях возникают *дополнительные* погрешности.

Из уравнений (2.1) и (2.2) можно получить

$$\gamma = \gamma_{\text{пр}} \frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{д}}}. \quad (2.3)$$

Следовательно, для прибора данного класса относительная погрешность измерения γ *не может быть меньше* класса $\gamma_{\text{пр}}$. И чем ближе измеренная величина к *пределу шкалы* прибора $A_{\text{н}}$, тем погрешность измерения γ будет ближе к $\gamma_{\text{пр}}$. Поэтому при измерениях,

чтобы уменьшить γ , надо прибор выбирать такой, у которого *измеряемая* величина была бы как можно *ближе* к *пределу шкалы* – чтобы показания прибора были *не менее* $\frac{3}{4}$ *предела шкалы*.


Пример. Вольтметром измерили напряжение U . Получили $U = 80$ В. Вольтметр класса точности $\gamma_{\text{пр}} = 1,0$. Предел измерения вольтметра 150 В. Тогда абсолютная погрешность $\Delta U = \pm 1,0 \frac{150}{100} = \pm 1,5$ В. Следовательно, $U_{\text{д}} = 80 - (\pm 1,5) = 80 \mp 1,5$ В. Тогда относительная погрешность измерения (в пределах) $\gamma = \frac{\pm 1,5}{80 \mp 1,5} 100 \% = (1,91 \% \div -1,84 \%)$.

2.4. Классификация измерительных приборов


Как выше было сказано, для измерений каждой физической величины, в том числе и электрической, разработаны и используются специальные приборы. Следовательно, основная классификация и электрических измерительных приборов обусловлена электрическими величинами (параметрами). Ее часто называют классификацией:

• По роду измеряемой величины:

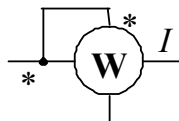
1. Вольтметр – прибор для измерения напряжения U и ЭДС E . Единица измерения вольт (В). Условно-графическое обозначение

прибора . Подключают к двум точкам цепи, между которыми необходимо измерить напряжение. А чтобы вольтметр при включении не изменял сопротивление между этими точками, вольтметр должен иметь большое внутреннее сопротивление, «стремящееся к бесконечности».

2. Амперметр – прибор для измерения электрического тока (иногда называют силы тока) I . Единица измерения ампер (А). Обозначение прибора

. Включают амперметр в разрыв электрической цепи, чтобы весь электрический ток I проходил через прибор. А чтобы прибор не изменил сопротивление всей цепи, амперметр должен иметь малое внутреннее сопротивление, близкое к нулю. «Нулевое» сопротивление – это «мечта амперметра».


3. Ваттметр – прибор для измерения активной электрической мощности. Единица измерения ватт (Вт).




Обозначение прибора . Как известно, активная мощность в электрической цепи определяется действующими значениями напряжения U и тока I , которые измеряются вольтметром и амперметром соответственно. Поэтому ваттметр имеет две обмотки, одна из которых измеряет напряжение U (включается и работает как вольтметр), а другая измеряет электрический ток I (включается в разрыв цепи и работает как амперметр). Для нормальной работы ваттметра выводы токовой обмотки и обмотки напряжения, отмеченные «звездочкой», соединяются вместе, как показано на рисунке (обозначение ваттметра).

Магнитное поле неподвижной обмотки $I_* - I$ создает такую магнитную силу, которая, взаимодействуя с магнитным полем подвижной обмотки $U_* - U$, заставляет эту подвижную обмотку поворачиваться на угол φ , пропорциональный мощности $P = UI \cos \varphi$.


4. Частотомер – прибор для измерения частоты электрического тока в приемнике. Единица измерения частоты герц. Обозначение

прибора  .


5. Фазометр – прибор для измерения сдвига фаз между электри-

ческими величинами. Обозначение  .


6. Омметр – прибор для измерения электрического сопротивле-

ния. Единица измерения ом. Обозначение  .

7. Генриметр – прибор для измерения индуктивности катушки (обмотки). Единица измерения индуктивности генри. Обозначение

прибора  .

8. Фарадометр – прибор для измерения электрической емкости электрического конденсатора. Единица измерения емкости фарада.

Обозначение прибора  . Так как фарада – сверхбольшая величина, то электрические емкости измеряют в микрофарадах $C = 1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, или в пикофарадах $C = 1 \text{ пкФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$.

9. Счетчик киловатт-часов – прибор для измерения энергии, полученной приемником в течение определенного времени. Обозначение

— kWh —
ние .

• **По методу измерения:**

1. Приборы непосредственной оценки.
2. Приборы сравнения – компенсационные и мостовые.

• **По роду измеряемого тока:**

1. Для измерения электрических величин постоянного тока.
2. Для измерения электрических величин однофазного переменного тока.

3. Для измерения электрических величин трехфазного тока.

• **По степени точности прибора (по классам точности):**

0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5. Класс точности определяет минимальную относительную погрешность измерений в процентах, которую может обеспечить данный прибор. Так, например, прибор класса 0,1 может обеспечить измерение с погрешностью 0,1 %, согласно с уравнением (2.3), только при $A_d = A_n$. Если стрелка прибора показывает меньше A_n , то погрешность $\gamma > 0,1$ %.

• **По принципу действия различают приборы с:**

- 1) магнитоэлектрической системой;
- 2) электромагнитной системой;
- 3) электродинамической системой;
- 4) индукционной системой;
- 5) электростатической системой;
- 6) ферродинамической системой;
- 7) логометры.

• **По представлению информации:**

1. Аналоговые приборы.
2. Цифровые приборы.

2.5. Методика измерений

1. Главное требование при любых измерениях – измерения не должны изменять параметры, характеристики и ход контролируемого процесса, изменять параметры и характеристики электрической цепи. Это означает, что включение в электрическую цепь любого измеряющего прибора не должно изменять электрическое сопротивление цепи (активное, индуктивное, емкостное). В противном случае мы получим

весьма искаженные результаты измерений даже при использовании высокоточного прибора, если неправильно включим его в цепь, или испортим сам прибор. Поэтому, прежде чем приступить к измерениям, необходимо внимательно изучить инструкцию по использованию выбранного измерительного прибора, а при отсутствии ее – получить пояснения у специалиста.

Рассмотрим методику измерений при помощи наиболее часто используемых приборов – вольтметров, амперметров и ваттметров. Знание этой методики необходимо также студентам при выполнении лабораторных работ по электротехнике.

2. Итак, самый-самый первостепенный прибор в электротехнике – это вольтметр. Как мы уже знаем, вольтметр предназначен для измерения электрического напряжения.

3. Измерение электрического тока осуществляется при помощи амперметров. Для этого необходимо весь ток пропустить через амперметр. Следовательно, амперметр необходимо включить в разрыв цепи. Но чтобы при его включении амперметр не искажал результаты измерений, необходимо, чтобы он (амперметр) имел сопротивление во много раз меньше, чем сопротивление цепи, в которой измеряется электрический ток.

На рис. 2.1 приведена схема замещения простейшей электрической цепи постоянного тока, в которой включен амперметр для измерения тока. Для того чтобы включение амперметра не изменило сопротивление всей цепи, т. е. не изменило действующего тока в цепи, необходимо, чтобы амперметр имел сопротивление многократно меньше сопротивления всей цепи, т. е. $r_a \ll R_{\text{и}} + R_{\text{н}}$. «Мечта амперметра» – иметь нулевое сопротивление. Тогда измеренный амперметром ток будет $I = \frac{E}{R_{\text{и}} + R_{\text{н}}}$.

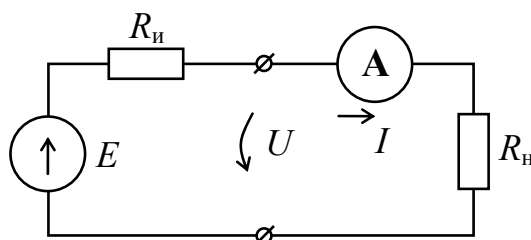


Рис. 2.1. Схема замещения электрической цепи

Измерение переменного тока выполняется по такой же методике, но амперметр выбирается для измерения переменного тока. Но при этом следует помнить, что амперметр измеряет не амплитудное значение, а действующее значение $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ (см. § 4.2 в гл. 2).

4. Измерение активной мощности в электрической цепи. Как известно, активная мощность определяется по формуле $P = UI \cos \varphi$. Следовательно, измерив напряжение и ток, мы определим и мощность. Поэтому для разовых измерений мощности нам не необходим ваттметр. Однако в тех случаях, когда требуется постоянный контроль мощности в электрической цепи, необходимо устанавливать ваттметр.

В этих случаях ваттметры устанавливаются перед тем участком, мощность электрической цепи которого намерены контролировать. На рис. 2.2 приведена схема замещения электрической цепи, в которой установлены ваттметры.

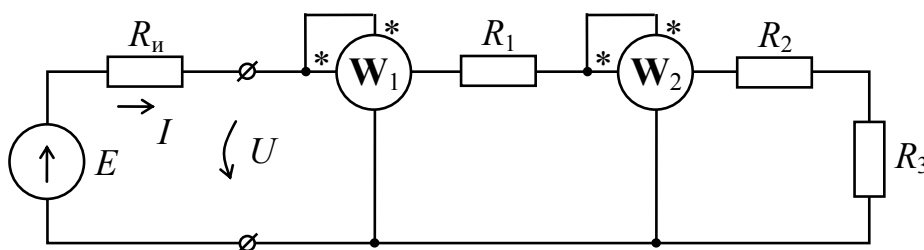


Рис. 2.2. Контроль мощности

5. Напряжение действует между двумя точками электрической цепи. Пусть нам необходимо измерить напряжение U_n на приемнике электрической энергии между точками 1 и 2, как показано на рис. 2.3 (схема замещения электрической цепи постоянного тока). Вольтметр необходимо включить параллельно сопротивлению нагрузки (приемника) между клеммами 1–2. Но для того чтобы вольтметр не исказил действительное значение напряжения U_n , необходимо, чтобы он имел сопротивление $R_V \gg R_n$. В идеале вольтметр должен иметь $R_V \rightarrow \infty$. Это «мечта вольтметра» – иметь бесконечно большое сопротивление! Только в этом случае $U_n = \frac{E}{R_{и} + R_n} R_n$ не изменится при

включении вольтметра, так как сопротивление между точками 1–2 $R_{1-2} = \frac{R_V R_H}{R_V + R_H} = \frac{R}{1 + \frac{R_H}{R_V}} = R_H$. При $R_V \gg R_H$ $U_H = U_V$.

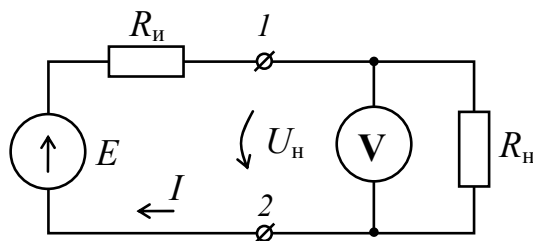


Рис. 2.3. Схема замещения электрической цепи

И в общем случае, в любой сколь угодно сложной цепи, при измерении напряжений между двумя любыми точками цепи необходимо соблюдать правило: сопротивление вольтметра должно быть многократно больше сопротивления между этими точками электрической цепи. Только тогда мы получим удовлетворительные результаты измерения.

Измерение напряжения в электрической цепи переменного синусоидального тока выполняется по такой же методике, но вольтметр выбирается для измерения переменного напряжения. При этом вольтметр измеряет не амплитудное значение напряжения U_m , а действующее значение $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ (тоже в вольтах).

В более сложных электрических цепях может появиться необходимость измерить напряжение на различных участках цепи. Например, на рис. 2.4 приведена электрическая цепь, где необходимо измерить напряжение на двух участках цепи.

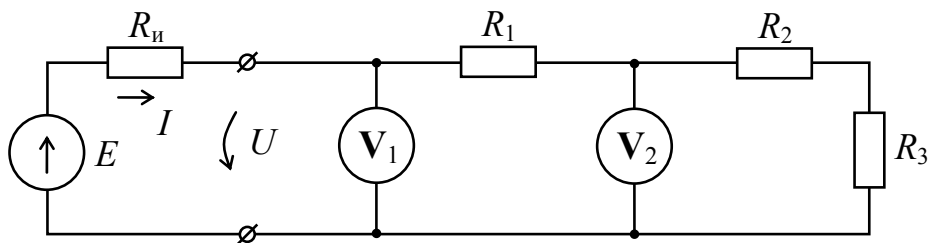


Рис. 2.4. Измерение напряжения на двух участках цепи

В этих случаях вольтметр включают параллельно участку электрической цепи перед тем участком цепи, на котором необходимо измерить напряжение.

2.6. Электронный осциллограф

Для визуального наблюдения и приближенных измерений ЭДС и напряжений в электротехнике и электронике широкое применение получили электронные осциллографы самых различных модификаций – от простейших до сложнейших, самого различного быстродействия, самой различной чувствительности. Однако принципиально они работают одинаково – по одному принципу действия. А так как мы будем пользоваться электронным осциллографом два семестра (по электротехнике и по электронике), то необходимо понять принцип его работы. Для этого рассмотрим блочную схему простейшего осциллографа, приведенную на рис. 2.5.

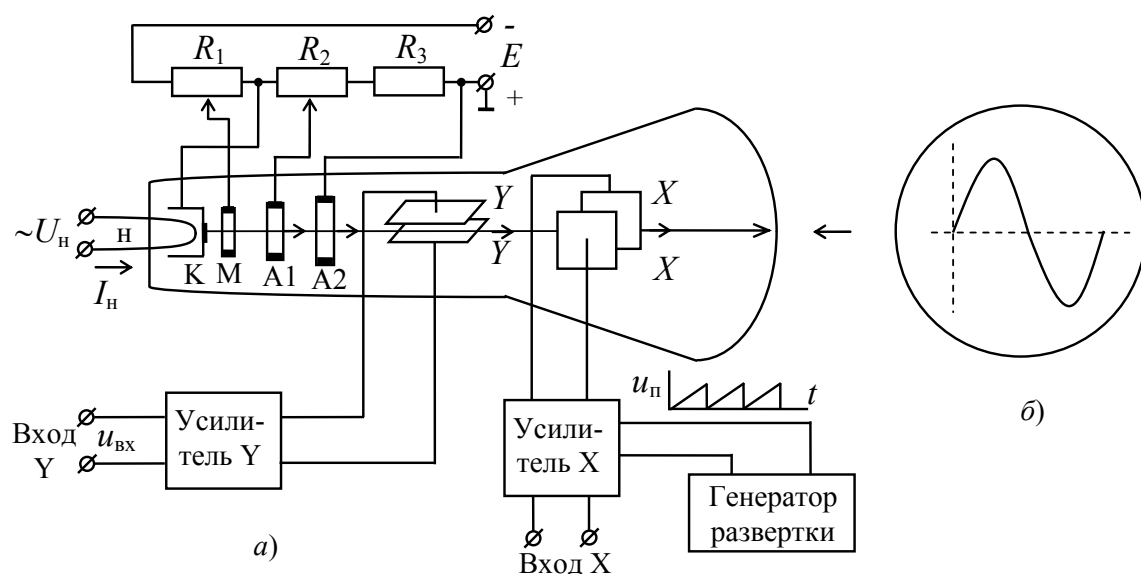


Рис. 2.5. Электронный осциллограф:
а – блок-схема; б – вид на трубку осциллографа
спереди (видна синусоида напряжения на экране)

Основным блоком любого осциллографа является электронно-лучевая стеклянная трубка, из которой выкачан воздух. Внутри трубки помещены (см. рис. 2.5 слева направо): нить накала Н, оксидный катод К, модулятор М (управляющая сетка, выполненная в виде отверстия для прохождения пучка электронов), анод А1 и анод А2, выполненные также в виде цилиндров с отверстиями для пучков элек-

тронов. Далее установлены вертикально отклоняющиеся пластины $Y-Y$ и горизонтально отклоняющиеся пластины $X-X$.

Расширенный торец трубки (справа) изнутри покрыт слоем специального состава, который светится при бомбардировке его электронами. Это свечение видно снаружи трубки (с торца справа).

Нить накала, питаемая током накала I_n , нагревает катод K , который испускает электроны. Относительно катода напряжение на модуляторе M отрицательное. Поэтому при помощи резистора R_1 можно регулировать количество пропускаемых электронов в пучке к анодам $A1$ и $A2$. А это значит, что при помощи переменных резисторов R_1 и R_2 можно сфокусировать тонкий пучок электронов.

На анод $A2$ относительно катода подается положительное высокое (до нескольких киловатт) напряжение E , «плюсом» на анод $A2$. Это напряжение на аноде $A2$ создает между катодом K и анодом $A2$ электрическое поле. Это поле быстро ускоряет движение пучка электронов, которые летят через вертикально и горизонтально отклоняющиеся пластины на светящийся экран (в торце трубки). Но это пока что неуправляемый световой луч. И на экране мы видим (снаружи справа) только светящееся пятно.

Для того чтобы наблюдать процесс во времени и пространстве, необходимо перемещать луч по вертикали (измерять напряжение u) и по горизонтали (измерять время t). С этой целью в осциллографе устанавливают дополнительные необходимые блоки, чтобы получить на экране временные графики.

С целью отклонения электронного луча по горизонтали пропорционально времени с определенной постоянной скоростью установлен генератор развертки. Этот генератор формирует пилообразное напряжение u_{Π} , которое возрастает с постоянной скоростью, а по достижении заданной величины мгновенно скачком возвращается до исходного значения, и далее процесс повторяется. Это напряжение развертки u_{Π} перемещает луч по горизонтали пропорционально времени t . Частота перемещения луча (частота f_x) может быть установлена любой путем установки частоты пилообразного напряжения u_{Π} . Для установления необходимой величины u_{Π} используется специальный усилитель (усилитель X).

Для наблюдения за величиной и формой исследуемого напряжения $u_{вх}$ используются вертикально отклоняющиеся пластины $X-X$, на

которые подается напряжение после усилителя U , усиливающего напряжение $u_{\text{вх}}$ до необходимой величины.

Электронные осциллографы практически безынерционны и позволяют наблюдать и исследовать напряжения любой формы и любой частоты. В настоящее время разработано и выпускается промышленностью великое множество различных типов электронных осциллографов со множеством дополнительных функций, в том числе и для одновременного исследования нескольких согласованных или чем-то связанных процессов.

Однако, повторимся, принцип действия их в своей основе один и тот же.

Вопросы

2.1. Значение измерений

1. Что такое «измерение физических величин»?
2. Необходимость измерений в электротехнике.
3. Что надо знать и уметь, чтобы получить правильные результаты измерений?

2.2. Общие сведения

1. Для чего в электротехнике используется информация, полученная при измерениях?
2. Что такое мера? Какие меры используют в электрических измерениях?
3. Что такое электроизмерительный прибор?

2.3. Погрешности измерений

1. Что такое «погрешность измерения»?
2. Абсолютная и относительная погрешности.
3. Основная приведенная погрешность прибора в процентах. Она определяет класс точности прибора!

2.4. Классификация измерительных приборов (и их обозначения на схемах)

1. По роду измеряемой величины.
2. По методу измерений.
3. По роду измеряемого тока.
4. По классам точности.
5. По принципу действия.
6. По представлению информации.

2.5. Методика измерений (на любых участках цепи)

1. Главное требование к любому прибору.
2. Как включить в цепь вольтметр?
3. Как включить в цепь амперметр?
4. Как включить в цепь ваттметр? (Включение показать на схемах и объяснить, почему надо так включать.)

2.6. Электронный осциллограф

1. Назначение электронного осциллографа.
2. Блок-схема электронного осциллографа.
3. Устройство электронно-лучевой трубки.
4. Назначение отклоняющих пластин $X-X$, $Y-Y$.
5. Назначение накала Н и катода К.
6. Назначение модулятора М.
7. Назначение анодов А1, А2.
8. Функции генератора развертки и усилителя У.
9. Функция усилителя У.
10. Назначение цепи R_1 , R_2 , R_3 .
11. Как производится наблюдение и измерение при помощи осциллографа в электрических цепях?

ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Источники ЭДС

Источник электрической энергии, как реальный элемент электрической цепи, может быть изображен соответствующей схемой замещения. На рис. 3.1 изображен источник постоянного тока, работающий на постоянную номинальную нагрузку сопротивлением $R_{\text{н}}$.

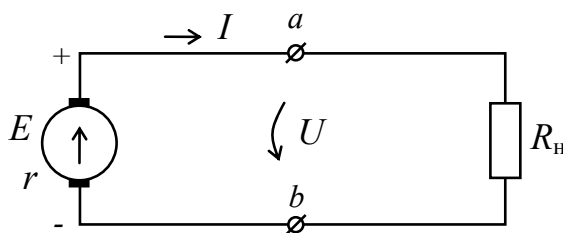


Рис. 3.1. Цепь с изображением реального генератора
(цепь возбуждения генератора не показана)

Генератор создает ЭДС E и имеет внутреннее сопротивление r .

При расчетах и анализе работы электрических цепей источник заменяют схемой замещения: идеальным источником ЭДС, имеющим ЭДС, равную E реального источника, и резистором, с равным сопротивлением внутреннему сопротивлению r источника, как показано на рис. 3.2.

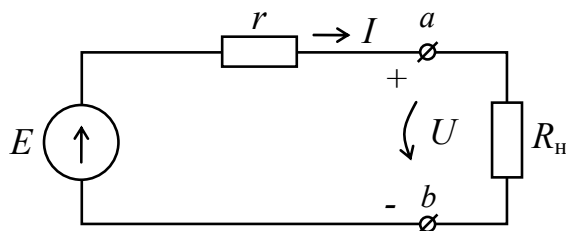


Рис. 3.2. Цепь с идеальным источником

Так как в реальных источниках всегда имеется внутреннее сопротивление r , поэтому из схемы замещения на рис. 3.2 уравнение внешней характеристики реального источника будет $U = E - rI$. А это значит, что при уменьшении $R_{\text{н}}$ напряжение на нагрузке будет уменьшаться по мере увеличения тока I , как показано на рис. 3.3, и при достижении тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$, когда будет $R_{\text{н}} = 0$,

напряжение на нагрузке $U = I_{\text{к}} \cdot 0 = 0$. Но надо помнить, что ток короткого замыкания в цепи $I_{\text{к}} = \frac{U}{0}$ при $R_{\text{н}} = 0$ опасен для электрической цепи!

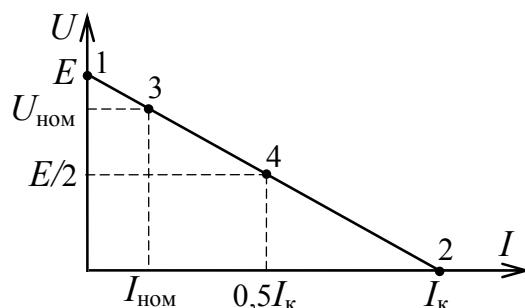


Рис. 3.3. Внешняя характеристика реальной цепи

Действительно, из внешней характеристики рис. 3.3 ток короткого замыкания $I_{\text{к}} = \frac{E - U}{r + R_{\text{н}}} = \frac{E - 0}{r + 0} = \frac{E}{r}$, а внутреннее сопротивление r источника очень мало!

Из внешней характеристики (рис. 3.3) можно увидеть, что у реального источника может быть бесконечное множество режимов работы (значений U и I). Однако обычно выделяют 4 основных режима (замечательных режима).

Точка 1. Режим холостого хода (ХХ). При этом $R_{\text{н}} = \infty$ (см. рис. 3.2). Следовательно, ток $I = \frac{E}{r + R_{\text{н}}} = \frac{E}{r + \infty} = 0$.

Это значит, что $U = E - I r = E - 0 \cdot r = E$. А это дает нам возможность в режиме холостого хода измерить вольтметром ЭДС E реального источника, так как у вольтметра (мы его включаем как нагрузку) $r_V \rightarrow \infty$.

Точка 2. Режим короткого замыкания (КЗ). При этом $R_{\text{н}} = 0$ и ток $I = \frac{E}{r} = I_{\text{к}}$, $U = 0$, $P_{\text{н}} = 0$, а вся мощность выделится внутри источника $P_{\text{к}} = I_{\text{к}}^2 r$. Так как r мало, то $I_{\text{к}}$ — недопустимо велик, и поэтому надо в цепи установить защиту от КЗ!

Точка 3. Режим номинальный. При этом $R_{\text{н}} = R_{\text{ном}}$, $I = I_{\text{ном}}$, $U = U_{\text{ном}}$, мощность $P = P_{\text{ном}}$.

Точка 4. Режим согласованный. При этом $R_{\text{н}} = r$, а мощность, выделяемая в нагрузке $P_{R_{\text{н}}} = P_{\text{max}}$, напряжение на нагрузке – половина ЭДС $U = \frac{E}{2}$, $I = \frac{E}{2r}$ – такой ток часто недопустим для источника. Однако этот режим часто используется в электронике для получения максимальной мощности в усилителях.

Из анализа внешней характеристики (вольт-амперной характеристики – ВАХ) реального источника энергии можно сделать вывод, что реальные источники нормально работают в номинальных режимах, близких к режиму идеального источника ЭДС, когда $R_{\text{н}} \gg r$, а это значит $U \approx E$. Поэтому часто можно подключать несколько приемников к такому источнику. При этом напряжение на приемниках будет изменяться незначительно.

3.2. О законах электротехники

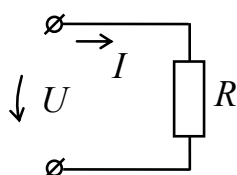
Электротехника базируется на физических законах, которые студенты изучают в курсе физики в разделе «Электричество и электромагнетизм» [1, с. 148–251].

Но в электротехнике эти законы используются с конкретными практическими целями, без подробных доказательств и объяснений, проводя расчеты, анализ и измерения в электрических цепях. При этом используются уже известные общепринятые единицы измерения различных физических величин.

Для расчета и анализа электрических цепей часто достаточно бывает закона Ома и двух законов Кирхгофа при правильно выбранных методе расчета и правилах преобразования цепи. Надо только четко понимать действие этих законов и умело пользоваться ими при составлении уравнений в конкретных электрических цепях.

Напомним эти законы для постоянного тока.

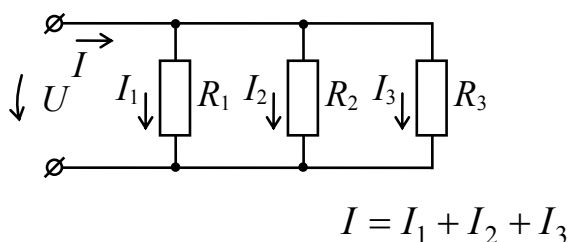
1. Закон Ома для участка цепи.



$$I = \frac{U}{R}$$

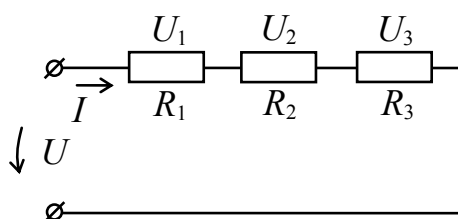
Ток на участке цепи равен напряжению на участке цепи, деленному на сопротивление участка цепи.

2. Первый закон Кирхгофа.



При параллельно соединенных приемниках на участке цепи общий ток на этом участке цепи равен сумме токов параллельно соединенных приемников.

3. Второй закон Кирхгофа.



Напряжение, приложенное к цепи, равно сумме напряжений на последовательно соединенных приемниках.

$U = U_1 + U_2 + U_3$, где по закону Ома

$$U = I R_1 + I R_2 + I R_3 = I (R_1 + R_2 + R_3).$$

3.3. Расчет электрической цепи с одним источником и одним приемником

Расчет электрической цепи с одним источником и одним приемником рассмотрим на примере.

Схема замещения цепи приведена на рис. 3.4. Известно $E = 100$ В, $U_H = 90$ В, $R_H = 20$ Ом. Определить: ток I_H , внутреннее сопротивление источника r , мощность в нагрузке P_H , построить внешнюю характеристику $U_H = f(I_H)$.

Решение. 1. Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи $E = I_H r + I_H R_H$, или $E = I_H r + U_H$.

2. Отсюда $U_H = E - I_H r$.

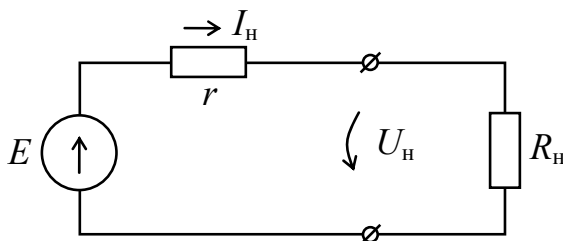


Рис. 3.4. Схема замещения электрической цепи

3. Зная U_H , определим ток в цепи по закону Ома

$$I_H = \frac{U_H}{R_H} = \frac{90}{20} = 4,5 \text{ А.}$$

4. Определим внутреннее сопротивление источника

$$r = \frac{E - U_H}{I_H} = \frac{100 - 90}{4,5} = 2,23 \text{ Ом.}$$

5. Определим мощность в нагрузке

$$P = U_H I_H = 90 \cdot 4,5 = 405 \text{ Вт.}$$

6. Или $P = I_H^2 R_H = 4,5^2 \cdot 20 = 405 \text{ Вт.}$

7. Построим внешнюю характеристику $U_H = E - rI_H$.

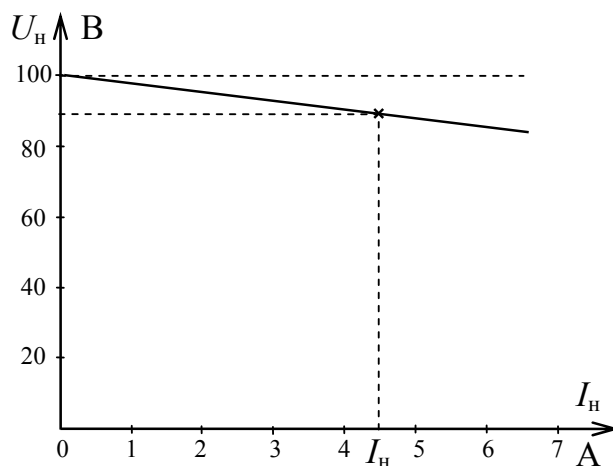


Рис. 3.5. Внешняя характеристика

Как видим из уравнения, наклон внешней характеристики зависит от величины сопротивления r источника.

3.4. Расчет электрической цепи с одним источником и тремя последовательно соединенными приемниками

Схема замещения цепи приведена на рис. 3.4. Известно: $E = 150 \text{ В}$, $U = 140 \text{ В}$, $R_1 = 20 \text{ Ом}$, $R_2 = 40 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$. Определить: ток I_H , внутреннее сопротивление источника r , падение напряжения на нагрузках U_1 , U_2 , U_3 и мощности, выделяемые в нагрузках P_1 , P_2 , P_3 , построить внешнюю характеристику цепи $U = f(I_H)$.

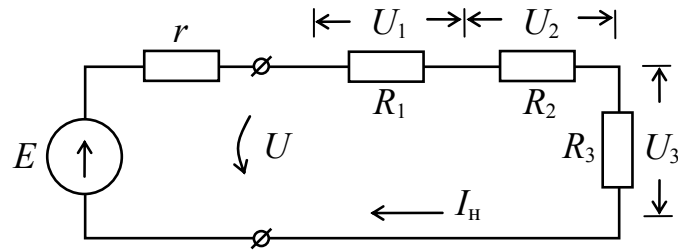


Рис. 3.6. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками

1. Упростим схему замещения. По второму закону Кирхгофа можно записать $U = U_1 + U_2 + U_3$. По всей цепи протекает один ток I_n . Тогда $U = R_1 I_n + R_2 I_n + R_3 I_n = (R_1 + R_2 + R_3) I_n = R_n I_n$. Таким образом, мы расчет свели к схеме замещения с одним приемником $R_n = R_1 + R_2 + R_3$. В общем случае $R_n = \sum_{i=1}^n R_i$.

2. Упрощенная схема замещения приведена на рис. 3.7.

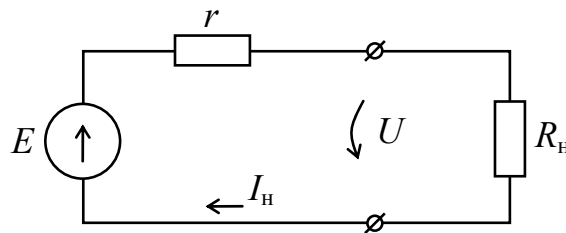


Рис. 3.7. Упрощенная схема замещения

3. Определим $R_n = 20 + 40 + 10 = 70$ Ом.

4. По закону Ома ток в цепи $I_n = \frac{U}{R_n} = \frac{140}{70} = 2$ А.

5. Определим внутреннее сопротивление источника из схемы замещения $r = \frac{E - U}{I_n} = \frac{150 - 140}{2} = 5$ Ом.

6. Определим падение напряжения на приемниках по схеме на рис. 3.6:

$$U_1 = I_n R_1 = 2 \cdot 20 = 40 \text{ В};$$

$$U_2 = I_n R_2 = 2 \cdot 40 = 80 \text{ В};$$

$$U_3 = I_n R_3 = 2 \cdot 10 = 20 \text{ В},$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 40 + 80 + 20 = 140 \text{ В}.$$

7. Определим мощности в приемниках:

$$P_1 = U_1 I_{\text{н}} = 40 \cdot 2 = 80 \text{ Вт};$$

$$P_2 = U_2 I_{\text{н}} = 80 \cdot 2 = 160 \text{ Вт};$$

$$P_3 = U_3 I_{\text{н}} = 20 \cdot 2 = 40 \text{ Вт},$$

или

$$P_1 = I_{\text{н}}^2 R_1 = 2^2 \cdot 20 = 80 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_{\text{н}}^2 R_2 = 2^2 \cdot 40 = 160 \text{ Вт};$$

$$P_3 = I_{\text{н}}^2 R_3 = 2^2 \cdot 10 = 40 \text{ Вт}.$$

8. Потери мощности внутри источника

$$P_{\text{ист}} = I_{\text{н}}^2 r = 2^2 \cdot 5 = 20 \text{ Вт}.$$

9. Проверим баланс мощностей. Мощность, развиваемая источником, должна быть равна сумме всех мощностей на нагрузках (приемниках) и мощности потерь в самом источнике (потерями в проводах пренебрегаем):

$$P = E I_{\text{н}} = 150 \cdot 2 = 300 \text{ Вт};$$

$$P = P_{\text{ист}} + P_1 + P_2 + P_3 = 20 + 80 + 160 + 40 = 300 \text{ Вт}.$$

Как видим, закон сохранения энергии выполняется.

10. Внешняя характеристика цепи $U = f(I_{\text{н}})$.

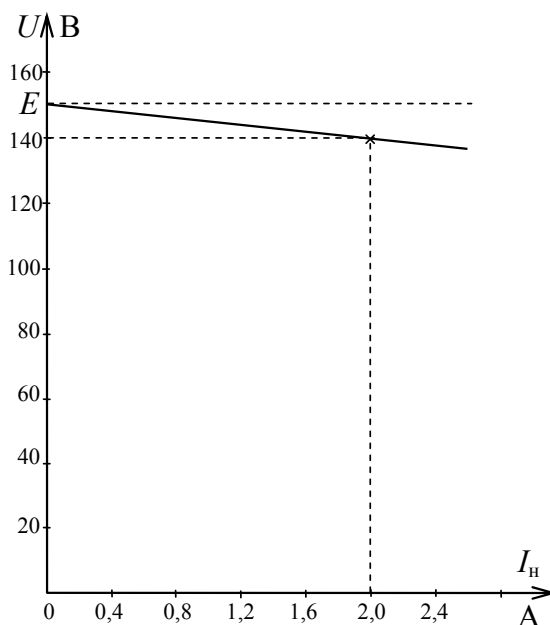


Рис. 3.8. Внешняя характеристика цепи

3.5. Расчет электрической цепи с одним источником и тремя параллельно соединенными приемниками

Схема замещения цепи приведена на рис. 3.9.

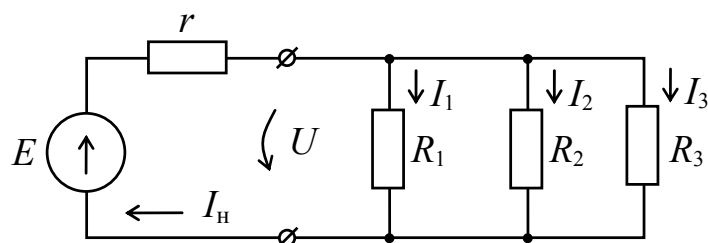


Рис. 3.9. Схема замещения электрической цепи

Известно: $E = 97$ В, $U = 95$ В, $R_1 = 25$ Ом, $R_2 = 50$ Ом, $R_3 = 10$ Ом.
 Определить: ток нагрузки I_H , внутреннее сопротивление источника r , токи в приемниках I_1, I_2, I_3 , мощности в приемниках P_1, P_2, P_3 , потери мощности в источнике $P_{\text{ист}}$, проверить баланс мощностей.
 $E I = P_{\text{ист}} + P_1 + P_2 + P_3$.

1. Упростим схему замещения цепи. Как видим из схемы замещения, ко всем приемникам приложено одинаковое напряжение $U_1 = U_2 = U_3 = U$. Тогда по закону Ома токи в приемниках будут $I_1 = \frac{U}{R_1} = U g_1$, $I_2 = \frac{U}{R_2} = U g_2$, $I_3 = \frac{U}{R_3} = U g_3$. Определим ток I_H (см. рис. 3.9) по первому закону Кирхгофа как сумму

$$I_H = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = U(g_1 + g_2 + g_3) = U g,$$

где g_1, g_2, g_3 – проводимости приемников, а $g = \frac{1}{R_H}$ – проводимость всей цепи. Следовательно, эквивалентное сопротивление всех параллельно соединенных приемников $R_H = \frac{1}{g}$. А в общем случае

$$R_H = \frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i}.$$

2. Теперь упрощенная схема замещения будет иметь вид, как на рис. 3.10.

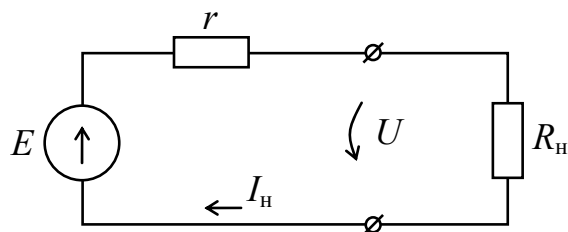


Рис. 3.10. Упрощенная схема замещения цепи

3. Определим проводимости $g_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{25} = 0,04$ См (сименс),

$$g_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ См}, \quad g_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{15} = 0,1 \text{ См}.$$

4. Определим эквивалентное сопротивление всех параллельно включенных приемников

$$R_H = \frac{1}{\sum_1^n g_i} = \frac{1}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{1}{0,04 + 0,02 + 0,1} = \frac{1}{0,16} = 6,25 \text{ Ом}.$$

5. Определим ток $I_H = \frac{U}{R_H} = \frac{95}{6,25} = 15,2$ А.

6. Токи в приемниках:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{95}{25} = 3,8 \text{ А}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{95}{50} = 1,9 \text{ А}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{95}{10} = 9,5 \text{ А}.$$

Тогда $I_H = I_1 + I_2 + I_3 = 3,8 + 1,9 + 9,5 = 15,2$ А. Первый закон Кирхгофа выполняется.

7. Рассчитаем мощности в приемниках и мощность потерь в источнике:

$$P_1 = U I_1 = 95 \cdot 3,8 = 362 \text{ Вт};$$

$$P_2 = U I_2 = 95 \cdot 1,9 = 180 \text{ Вт};$$

$$P_3 = U I_3 = 95 \cdot 9,5 = 902 \text{ Вт}.$$

Мощность потерь в источнике

$$P_{\text{ист}} = (E - U) I_H = (97 - 95) \cdot 15,2 = 30,4 \text{ Вт}.$$

8. Баланс мощностей:

$$EI_{\text{н}} = P_{\text{ист}} + P_1 + P_2 + P_3;$$

$$EI_{\text{н}} = 97 \cdot 15,2 = 1475 \text{ Вт};$$

$$P = P_{\text{ист}} + P_1 + P_2 + P_3 = 30,4 + 362 + 180 + 902 = 1475 \text{ Вт}.$$

Расчет произведен правильно. Баланс мощностей выполняется.

3.6. Расчет электрической цепи со смешанным соединением приемников (последовательно-параллельное соединение)

Схема замещения цепи приведена на рис. 3.11.

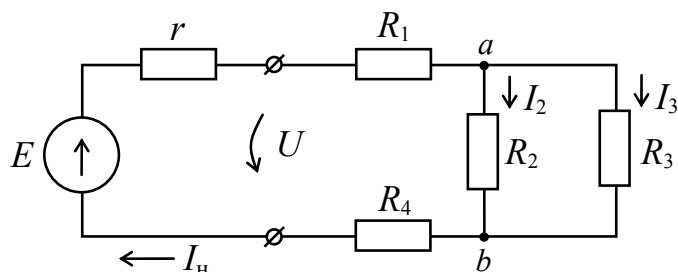


Рис. 3.11. Электрическая цепь со смешанным соединением приемников

Известно: $E = 100 \text{ В}$, $U = 95 \text{ В}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 40 \text{ Ом}$, $R_3 = 50 \text{ Ом}$, $R_4 = 15 \text{ Ом}$. Определить: токи $I_{\text{н}}$, I_2 , I_3 , сопротивление r , напряжение U_{ab} между узлами a – b , мощности P_1 , P_2 , P_3 в приемниках, мощность потерь $P_{\text{ист}}$ в источнике, проверить баланс мощностей.
 $E I_{\text{н}} = P_{\text{ист}} + P_1 + P_2 + P_3 + P_4.$

1. Упростим схему замещения цепи. Как видим из рис. 3.11, в схеме замещения два приемника R_1 и R_4 соединены последовательно, а два приемника R_2 и R_3 соединены параллельно. По правилам, рассмотренным в § 3.2 и 3.3, мы их можем заместить одним приемником (резистором):

а) $R_{14} = R_1 + R_4 = 10 + 15 = 25 \text{ Ом}$, так как через них протекает один и тот же ток $I_{\text{н}}$;

$$\text{б) } R_{23} = \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{1}{50}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{40 \cdot 50}{40 + 50} = 22 \text{ Ом}.$$

2. Теперь схема замещения будет, как на рис. 3.12.

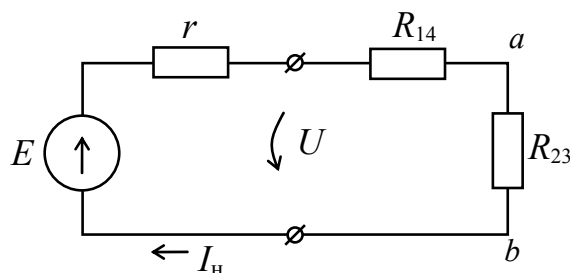


Рис. 3.12. Схема замещения цепи

3. Заменяем приемники (резисторы) R_{14} и R_{23} одним приемником

$$R_{\text{н}} = R_{14} + R_{23} = 25 + 22 = 47 \text{ Ом.}$$

4. И теперь упрощенная схема замещения цепи будет, как на рис. 3.13.

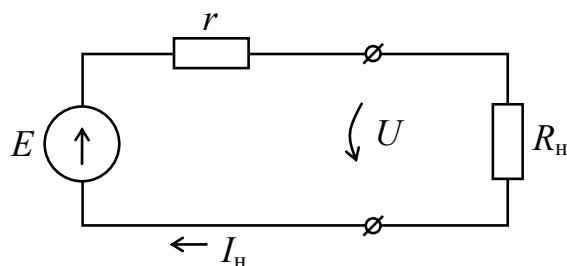


Рис. 3.13. Упрощенная схема замещения цепи

5. Из упрощенной схемы замещения на рис. 3.13 определяем:

а) по закону Ома $I_{\text{н}} = \frac{U}{R_{\text{н}}} = \frac{95}{47} = 2,02 \text{ А};$

б) внутреннее сопротивление источника

$$r = \frac{E - U}{I_{\text{н}}} = \frac{100 - 95}{2,02} = 2,47 \text{ Ом.}$$

6. Из схемы на рис. 3.12 определим напряжение U_{ab} между узлами $a-b$, $U_{ab} = I_{\text{н}} R_{23} = 2,02 \cdot 22 = 44,4 \text{ В.}$

7. Тогда в схеме замещения цепи на рис. 3.11 ток $I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2} = \frac{44,4}{40} = 1,11 \text{ А,}$ а ток $I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3} = \frac{44,4}{50} = 0,89 \text{ А.}$

8. Определим мощности в приемниках и мощность потерь в источнике:

$$P_1 = I_H^2 R_1 = 2,02^2 \cdot 10 = 41 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 1,11^2 \cdot 40 = 49,4 \text{ Вт, или } P_2 = U_{ab} I_2 = 44,4 \cdot 1,11 = 49,4 \text{ Вт};$$

$$P_3 = I_3^2 R_3 = 0,89^2 \cdot 50 = 39,6 \text{ Вт, или } P_3 = U_{ab} I_3 = 44,4 \cdot 0,89 = 39,6 \text{ Вт};$$

$$P_4 = I_H^2 R_4 = 2,02^2 \cdot 15 = 62 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{ист}} = I_H^2 r = 2,02^2 \cdot 2,47 = 10 \text{ Вт},$$

или $P_{\text{ист}} = (E - U) I_H = (100 - 95) \cdot 2 = 10 \text{ Вт}.$

9. Проверим баланс мощностей. Мощность, выделяемая источником, $P_{\Sigma} = E I_H = 100 \cdot 2,02 = 202 \text{ Вт}.$

Мощность, воспринимаемая приемниками, и потери на нагрев источника

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_{\text{ист}} = 41 + 49,4 + 39,6 + 62 + 10 = 202 \text{ Вт}.$$

Баланс мощности в цепи выполняется (погрешность 0,1 %).

3.7. Расчет цепей с несколькими источниками ЭДС

На практике часто встречаются разветвленные электрические цепи с несколькими источниками ЭДС. Например, если мощности одного источника энергии недостаточно для питания одного приемника, то для питания этого приемника могут быть подключены еще один или несколько источников. В этом случае через приемник потечет суммарный ток, например, $I_H = I_1 + I_2$ от двух источников, как показано на схеме замещения цепи на рис. 3.14.

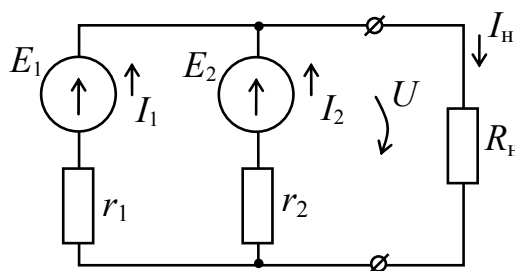


Рис. 3.14. Схема замещения цепи с двумя источниками

Однако так же часто к одному мощному источнику (генератору) подключают несколько двигателей (приемников), в результате получается сложная электрическая цепь с несколькими источниками. На-

пример, в электрической схеме на рис. 3.15 показано подключение двух двигателей постоянного тока Д1 и Д2 к генератору постоянного тока Г.

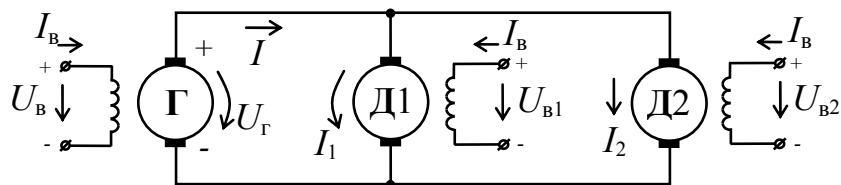


Рис. 3.15. Схема питания двух двигателей от одного генератора

При постоянном неизменном токе в обмотках возбуждения электрическую цепь на рис. 3.15 можно заменить схемой замещения с учетом ЭДС якоря двигателей E_1 и E_2 (рис. 3.16).

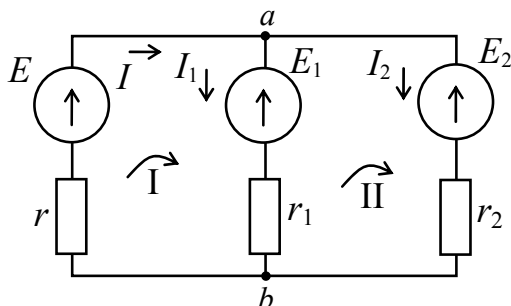


Рис. 3.16. Схема замещения электрической цепи на рис. 3.15

ЭДС E_1 и E_2 , создаваемые обмотками якоря двигателей Д1 и Д2, меньше ЭДС E генератора. Поэтому ветви 1 и 2 потребляют энергию, получаемую от генератора. Поэтому на рис. 3.16 токи I_1 и I_2 направлены против (встречно) своих ЭДС E_1 и E_2 , т. е. эти ЭДС E_1 и E_2 направлены против ЭДС E генератора (их часто называют противо-ЭДС).

Произведем расчет электрической цепи на рис. 3.15, схема замещения которой показана на рис. 3.16, при помощи законов Ома и Кирхгофа.

Обычно известно (из паспортных данных или путем измерений) ЭДС генератора и двигателей E , E_1 , E_2 и сопротивления обмоток якорей r , r_1 , r_2 .

Пусть $E = 200$ В, $E_1 = 180$ В, $E_2 = 180$ В, $r = 2$ Ом, $r_1 = 4$ Ом, $r_2 = 4$ Ом.

Необходимо определить токи I , I_1 , I_2 , мощности P , P_1 , P_2 , развиваемые в генераторе и в двигателях, а также мощности потерь.

1. Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла a :

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.1)$$

2. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа по контуру 1:

$$I r + I_1 r_1 = E - E_1; \quad (3.2)$$

по контуру 2:

$$-I_1 r_1 + I_2 r_2 = E_1 - E_2. \quad (3.3)$$

Подставим в уравнения (3.2) и (3.3) цифровые значения r и E :

$$\begin{cases} 2I + 4I_1 = 200 - 180; \\ -4I_1 + 4I_2 = 180 - 180 = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений с учетом уравнения (3.1), получим $I_1 = I_2 = 2,5$ А, $I = 5$ А.

Определим мощности потерь в генераторе и в двигателях на нагрев обмоток якоря и мощности генератора и двигателей.

$$p_{\text{и}} = I^2 r = 5^2 \cdot 2 = 50 \text{ Вт} - \text{потери в генераторе};$$

$$p_1 = I_1^2 r_1 = 2,5^2 \cdot 4 = 25 \text{ Вт} - \text{потери в двигателе Д1};$$

$$p_2 = I_2^2 r_2 = 2,5^2 \cdot 4 = 25 \text{ Вт} - \text{потери в двигателе Д2};$$

$$P_1 = E_1 I_1 = 180 \cdot 2,5 = 450 \text{ Вт} - \text{мощность двигателя Д1};$$

$$P_2 = E_2 I_2 = 180 \cdot 2,5 = 450 \text{ Вт} - \text{мощность двигателя Д2};$$

$$P = E I = 200 \cdot 5 = 1000 \text{ Вт} - \text{мощность генератора.}$$

Проверим баланс мощностей:

$$P = p_{\text{и}} + p_1 + p_2 + P_1 + P_2 = 50 + 25 + 25 + 450 + 450 = 1000 \text{ Вт.}$$

Баланс мощностей выполняется.

Для расчета сложных электрических цепей в электротехнике разработано несколько специальных методов, например, метод контурных токов, метод двух узлов, метод наложения, метод эквивалентного генератора и др., с которыми, при необходимости, можно ознакомиться в соответствующей литературе [1]–[4].

Из них рассмотрим метод эквивалентного генератора, который хорош при анализе и расчете сложной цепи, когда нас интересует одна ветвь (один приемник).

3.8. Расчет сложной цепи методом эквивалентного генератора

Используется для анализа и расчета тока в одной ветви, особенно хорош при изменяющемся сопротивлении исследуемой ветви.

Идея метода: для интересующей нас ветви безразлично, под действием каких сторонних сил в ней протекает ток – от нескольких ЭДС через сложные соединения других приемников в цепи или от одного источника ЭДС со своим внутренним сопротивлением. Лишь бы на входе интересующего нас приемника (выделенной ветви сложной цепи) было напряжение U , под действием которого в ветви протекает ток.

Отсюда следует, что всю остальную часть электрической цепи, кроме выделенной ветви, можно заменить некоторым эквивалентным генератором, который создавал бы на входе выделенной ветви (приемника) такое же напряжение U и имел бы такое же внутреннее сопротивление R_3 относительно выделенного приемника, какое имеет остальная часть сложной цепи.

Пусть мы имеем сложную цепь, показанную на рис. 3.17.

$E_1 = 50$ В, $E_2 = 30$ В, $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 5$ Ом, $R_3 = 15$ Ом, $R_4 = 10$ Ом.

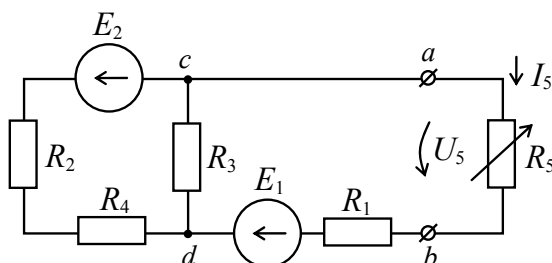


Рис. 3.17. Сложная цепь с двумя источниками ЭДС

В этой сложной цепи нас интересует ветвь (приемник) R_5 , сопротивление которого может изменяться, и, следовательно, будет изменяться ток в этой ветви.

Заменим всю остальную часть цепи эквивалентным генератором, как на рис. 3.18.

Уравнение этой электрической цепи по второму закону Кирхгофа

$$E_3 = I_5 R_5 + U_5.$$

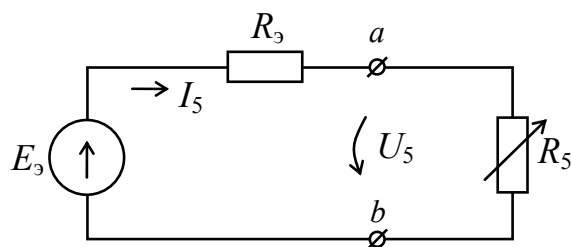


Рис. 3.18. Схема замещения цепи ветви R_5

Для того, чтобы воспользоваться этим эквивалентным генератором, необходимо определить его ЭДС E_3 и его внутреннее сопротивление R_3 .

В режиме холостого хода ХХ, когда $R_5 = \infty$ (убирают R_5), а ток $I_5 = 0$, напряжение $U_{5\text{ХХ}} = E_3 - I_5 R_3 = E_3 - 0 \cdot R_3 = E_3$, т. е. $E_3 = U_{5\text{ХХ}}$.

В режиме короткого замыкания КЗ клеммы $a-b$ замыкаются накоротко. При этом $U_5 = 0$, а $R_3 = \frac{E_3}{I_{5\text{КЗ}}}$, где E_3 и $I_{5\text{КЗ}}$ можно определить экспериментально, путем измерений, если это возможно (рис. 3.19).

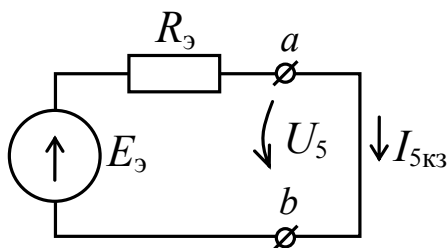


Рис. 3.19. Режим КЗ

А при расчетах поступаем следующим образом:

1. Из цепи на рис. 3.17 убираем ветвь R_5 . Получаем цепь в режиме ХХ (режим холостого хода), где $U_{5\text{ХХ}} = E_3$.

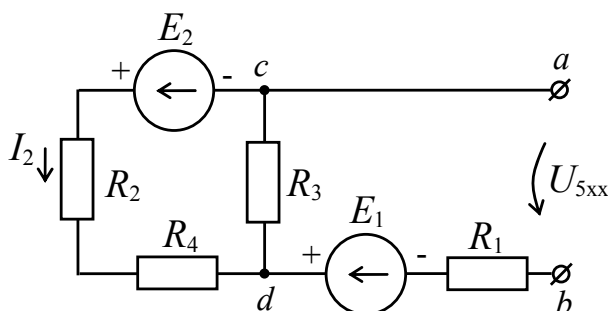


Рис. 3.20. Режим ХХ

По закону Ома определим ток

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{30}{5 + 15 + 10} = 1 \text{ А.}$$

Тогда напряжение между узлами $c-d$ будет

$$U_{cd} = I_2 R_2 = 1 \cdot 15 = 15 \text{ В.}$$

Удалим сопротивление R_5 из схемы на рис. 3.17 и получим схему замещения цепи без резистора R_5 на рис. 3.20, где напряжение $U_{ab} = U_{5xx}$. Определим это напряжение.

По второму закону Кирхгофа $U_{5xx} = E_1 - U_{cd} = 50 - 15 = 35 \text{ В.}$

Это означает, что эквивалентное ЭДС E_9 цепи на рис. 3.18 будет

$$E_9 = U_{5xx} = 35 \text{ В.}$$

2. Для определения внутреннего сопротивления R_9 источника E_9 на рис. 3.18 удалим источники ЭДС E_1 и E_2 в схеме на рис. 3.20. Тогда

$$R_{24} = R_2 + R_4 = 5 + 10 = 15 \text{ Ом.}$$

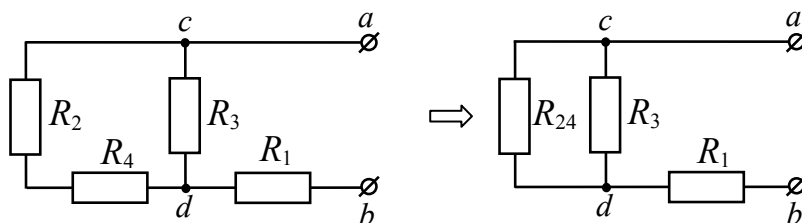


Рис. 3.21. Упрощение схемы

После второго упрощения получим схемы на рис. 3.22.

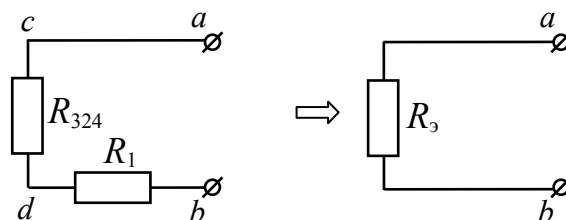


Рис. 3.22. Внутреннее сопротивление эквивалентного генератора

где $R_{324} = \frac{R_3 R_{24}}{R_3 + R_{24}} = \frac{15 \cdot 15}{15 + 15} = 7,5 \text{ Ом}$, а $R_9 = R_1 + R_{324} = 10 + 7,5 = 17,5 \text{ Ом}$.

Теперь легко решаем цепь с выделенным приемником R_5 , показанным на рис. 3.18: ток $I_5 = \frac{E_9}{R_9 + R_5} = \frac{35}{17,5 + R_5}$. Для конкретного значения, например, $R_5 = 10$ Ом, $I_5 = \frac{35}{17,5 + 10} = 1,27$ А.

Когда $R_5 = 0$, ток КЗ $I_{5\text{кз}} = \frac{E_9}{R_9} = \frac{35}{17,5} = 2$ А.

Таким образом, в этой конкретной задаче, решенной по методу эквивалентного генератора, ток в ветви R_5 может изменяться в пределах $I_5 = 0 - 2$ А при изменении $R_5 = \infty - 0$.

Вопросы

3.1. Источники ЭДС с нагрузкой

1. Цепь с изображением реального генератора.
2. Схема замещения реальной цепи.
3. Внешняя характеристика $U = f(I)$ реальной цепи.
4. Четыре «основных» режима работы электрической цепи.
5. Почему опасен ток короткого замыкания при $R_H = 0$ для генератора?
6. Почему можно подключать несколько приемников к одному источнику?

3.2. О законах электротехники

1. Закон Ома для участка цепи.
2. Первый закон Кирхгофа для участка цепи с параллельно соединенными резисторами.
3. Второй закон Кирхгофа для участка цепи с последовательно соединенными резисторами.

3.3. Расчет цепи с одним источником и одним приемником

1. Схема замещения. Известно E , U , R_H .
2. Определить I_H , r_{BH} , P_H .
3. Построить внешнюю характеристику.

3.4. Расчет цепи с одним источником и тремя последовательно соединенными приемниками

1. Схема замещения. Известно E , U , R_1 , R_2 , R_3 .
2. Определить I_H , r_{BH} , U_1 , U_2 , U_3 , P_1 , P_2 , P_3 , P .
3. Построить внешнюю характеристику.
4. Упростить схему замещения.

3.5. Расчет цепи с одним источником и тремя приемниками, соединенными параллельно

1. Схема замещения. Известно E, U, R_1, R_2, R_3 .
2. Определить $I_n, r_{вн}, I_1, I_2, I_3, P_1, P_2, P_3, P$.
3. Упрощение схемы. Проводимости приемника.
4. Баланс мощностей.

3.6. Расчет цепи со смешанным соединением приемников

1. Схема замещения. Известно E, U, R_1, R_2, R_3, R_4 .
2. Определить $I_n, I_2, I_3, U_{ab}, P_1, P_2, P_3, P_{ист}$.
3. Упрощение схемы. Расчет.
4. Баланс мощностей.

3.7. Расчет цепей с несколькими источниками ЭДС

1. Примеры таких цепей.
2. Схема замещения реальной цепи питания двух двигателей от одного генератора. Известно E, E_1, E_2, r, r_1, r_2 . Определить I, I_1, I_2, P, P_1, P_2 .
3. Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура I и контура II и по первому закону Кирхгофа для узла a .
4. Решаем систему уравнений.

3.8. Расчет сложной цепи методом эквивалентного генератора

1. Идея метода.
2. Дана сложная цепь с двумя источниками, в которой нас интересует один приемник с изменяющимся сопротивлением.
3. Всю цепь, кроме выделенного приемника, заменяем эквивалентным генератором с $E_э$ и $r_э$.
4. Определяем $E_э$ и $r_э$.
5. Решаем цепь с источником $E_э, r_э$ и одним выделенным приемником R для значений $R = R_{\max}$ и $R = 0$.

ГЛАВА 4 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

4.1. Представление синусоидальных ЭДС, токов и напряжений тригонометрическими функциями и графиками

Итак, пусть мы имеем цепь синусоидального тока, схема замещения которой приведена на рис. 4.1.

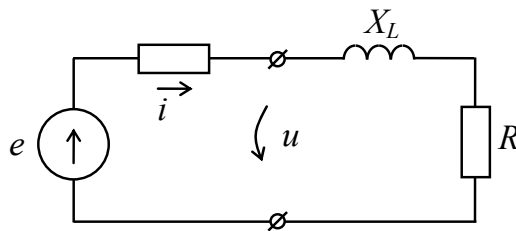


Рис. 4.1. Схема замещения электрической цепи

По замкнутой цепи, изображенной на рис. 4.1, протекает синусоидальный ток i промышленной частоты $f = 50$ Гц. Когда ток протекает по часовой стрелке, будем считать этот ток положительным, когда ток протекает против часовой стрелки – будем считать его отрицательным.

В общем случае, ЭДС e , под действием которой протекает ток i , можно представить при помощи тригонометрической функции

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e), \quad (4.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота [см. с. 19, уравнение (1.7)].

Графически ЭДС можно изобразить в виде временных диаграмм (рис. 4.2).

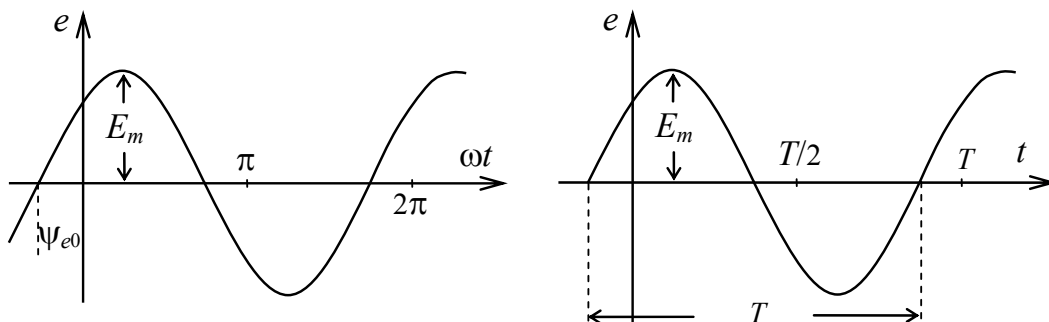


Рис. 4.2. Временные диаграммы ЭДС

Амплитуда E_m – максимальное значение функции.

Аргумент функции $(\omega t + \psi_e)$ – фаза. Фаза характеризует состояние колебания (числовое значение функции) в данный момент времени t . В момент $t = 0$ значение функции определяет начальная фаза ψ_{e0} . В частном случае, если мы выберем начало отсчета в момент, когда $\psi = 0$ при $t = 0$, то $e = E_m \sin \omega t$.

Таким образом, любая синусоидальная функция определяется тремя величинами: амплитудой E_m , угловой частотой ω и начальной фазой ψ .

Так как форма кривых синусоидального тока не изменяется при прохождении *линейных* электрических цепей, то можно записать и для токов, и для напряжений:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (4.2)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (4.3)$$

где i, u – мгновенные значения тока, напряжения.

Начальная фаза может быть и отрицательна (рис. 4.3), $i = I_m \sin(\omega t - \psi_i)$.

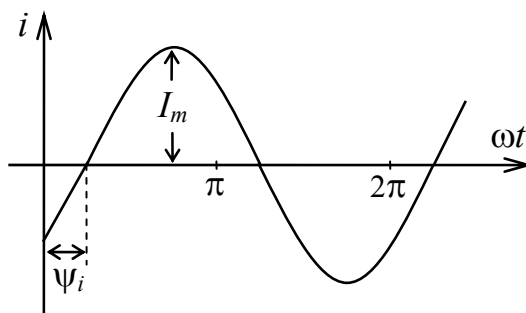


Рис. 4.3. Временная диаграмма тока

Таким образом, если ближайшая к началу координат точка перехода синусоиды от отрицательных значений к положительным находится слева от начала координат, то ψ положительна, если справа – отрицательна ($-\psi$).

Между двумя синусоидальными разноименными функциями может быть сдвиг по фазе. Например, если имеем $e = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$ и $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, то графики будут иметь вид (в зависимости от соотношений начальных фаз ψ_e и ψ_i), как показано на рис. 4.4.

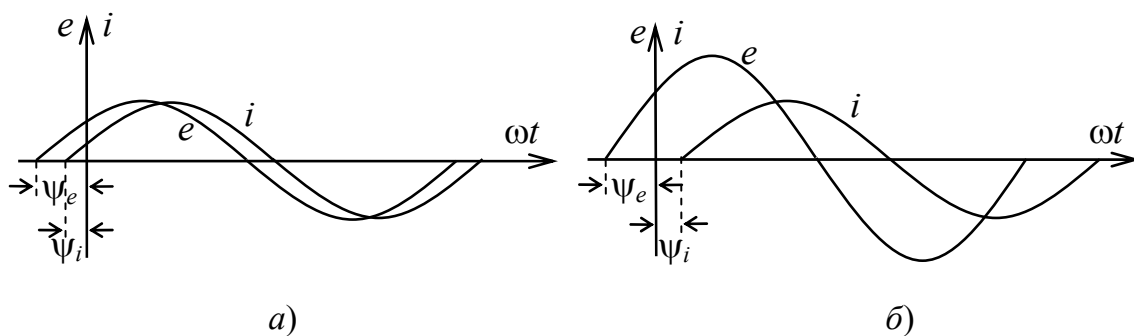


Рис. 4.4. Сдвиг по фазе между e и i :
 а – ток отстает от ЭДС, но $\psi_i > 0$;
 б – ток отстает от ЭДС, но $\psi_i < 0$

Угол сдвига фаз $\varphi = \omega t + \psi_e - (\omega t + \psi_i) = \psi_e - \psi_i$, или на рис. 4.4, б $\varphi = \omega t + \psi_e - (\omega t - \psi_i) = \psi_e + \psi_i$. И в том, и в другом случае ток отстает от ЭДС на угол φ , но величины φ различны.

Если же $\psi_i > \psi_e$, то говорят, что ток опережает ЭДС на угол φ .

Если сдвиг по фазе происходит между *одноименными* функциями (e_1 и e_2 , i_1 и i_2 , u_1 и u_2), то обычно угол сдвига фаз обозначают буквой α . Так, на рис. 4.5 показан сдвиг фаз α между u_1 и u_2 .

$\alpha = \psi_1 + \psi_2$ – напряжение u_1 опережает u_2 .

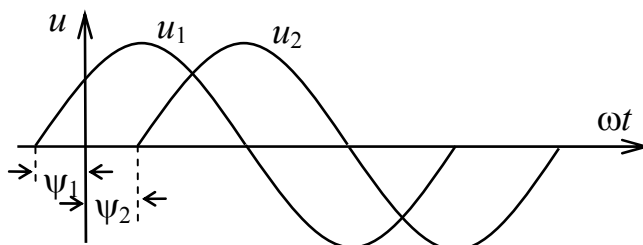


Рис. 4.5. Сдвиг по фазе между u_1 и u_2

Примечание для студентов! Электрические и электронные процессы нельзя увидеть непосредственно глазами. Поэтому надо научиться представлять эти процессы «в уме», и это представление отражать на бумаге в виде временных графиков. А потом в лаборатории удостовериться в правильности своих воззрений при помощи хорошего осциллографа. Только так мы научимся представлять в своем уме невидимые электрические процессы. И не только электрические!

4.2. Действующие значения синусоидальных токов, ЭДС, напряжений

В реальности любую работу совершает энергия, а не мгновенные и не амплитудные значения синусоидального тока, т. е. совершают так называемые действующие значения синусоидального тока и напряжения. Что примечательно, и электроизмерительные приборы тепловой, электромагнитной, электродинамической, электростатической систем измеряют именно действующие значения. Поэтому и при расчетах цепей синусоидального тока используют действующие значения токов, ЭДС и напряжений.

Введем понятие и величину действующего значения тока.

Пусть через электрическую плитку, которая имеет неизменное активное сопротивление r , протекает постоянный ток I . При этом за определенное время T в плитке выделится энергия $W = I^2 r T$, т. е. $W = P T$.

Теперь вместо постоянного тока пропустим синусоидальный ток такой величины, чтобы в плитке за это же время T выделилась такая же энергия

$$W = I^2 r T = \int_0^T i^2 r dt = \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t r dt. \quad (4.4)$$

Для удобства интегрирования примем время T равным периоду синусоидального тока. Тогда

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Эта величина $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ называется *действующим* значением синусоидального тока (т. е. величина $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ действует так же, как постоянный ток I). Аналогично действующие значения ЭДС и напряжения принимают $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$ и $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

4.3. Представление синусоидальных токов и напряжений вращающимися векторами

При изображении синусоидальных ЭДС, токов и напряжений вращающимися векторами на декартовой плоскости из начала координат проводят вектор, равный амплитудному значению, и вращают этот вектор *против* часовой стрелки с угловой скоростью, равной угловой частоте ω . Фазовый угол при вращении отсчитывают от положительной оси абсцисс (оси x). *Проекции вращающегося вектора на ось ординат y равны мгновенным значениям синусоидальной величины.* Например, на рис. 4.6 и 4.7 показано синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi)$.

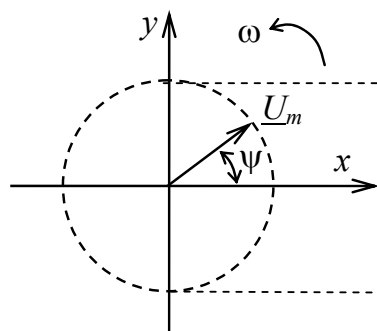


Рис. 4.6. Вектор \underline{U}_m вращается против часовой стрелки

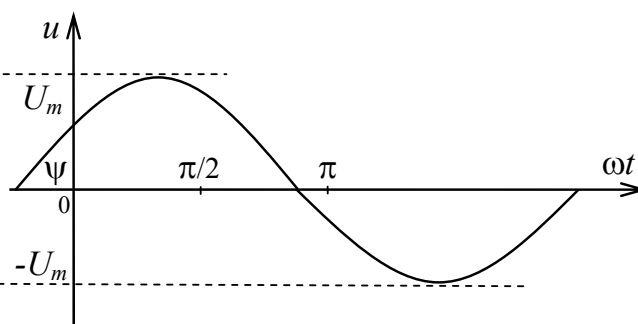


Рис. 4.7. Развертка во времени вращающегося вектора \underline{U}_m

Совокупность векторов, изображающих синусоидальные ЭДС, токи и напряжения одной частоты, называют векторными диаграммами. При построении векторных диаграмм векторы удобно располагать для начального момента времени, т. е. *при $t = 0$* . Например, даны $e = E_m \sin(\omega t + \psi_1)$, $i = I_m \sin(\omega t - \psi_2)$, $u = U_m \sin(\omega t + \psi_3)$. Расположение векторов будет, как на рис. 4.8.

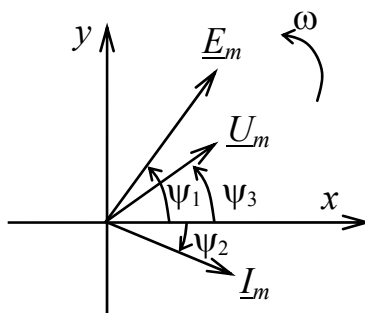


Рис. 4.8. Расположение векторов

Векторные диаграммы нашли широкое применение при анализе режимов работы цепей синусоидального тока. Их применение делает расчет цепи более наглядным и простым, так как сложение и вычитание мгновенных значений величин можно заменить сложением и вычитанием их векторов. Например, по первому закону Кирхгофа для некоторого узла цепи $i_1 = i_2 + i_3$, причем $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2)$ и $i_3 = I_{m3} \sin(\omega t + \psi_3)$. Отсюда $i_1 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2) + I_{m3} \sin(\omega t + \psi_3) = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$.

Значения I_{m1} и ψ_1 получить путем преобразований тригонометрических величин неудобно, громоздко и мало наглядно. При помощи векторной диаграммы это сделать легко (рис. 4.9).

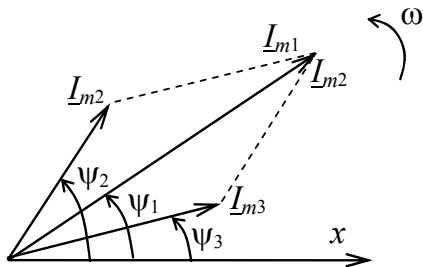


Рис. 4.9. Суммирование векторов

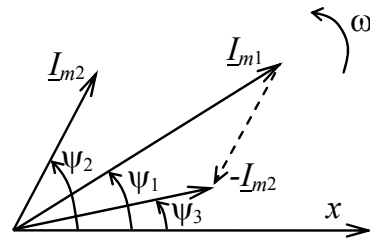


Рис. 4.10. Вычитание векторов

Если даны i_1 и i_2 , а необходимо найти $i_3 = i_1 - i_2$, то производят вычитание векторов (рис. 4.10).

4.4. Электрическая цепь с резистивным элементом

Параметр резистивного элемента – активное сопротивление R , в котором поглощается электрическая энергия, равная энергии, потребляемой *реальным* замещаемым элементом электрической цепи. К зажимам цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$. При расчетах и анализе работы цепи нас интересуют действующие значения: напряжение U на приемнике, ток I в приемнике и мощность P в приемнике.

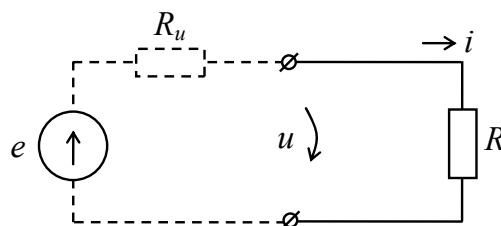


Рис. 4.11. Цепь с резистором

Мгновенное значение тока в цепи по закону Ома для мгновенных значений:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$; $\psi_i = \psi_u$.

Если разделить $\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{R}$, то $I = \frac{U}{R}$ — закон Ома для действующих значений, как и для цепи постоянного тока.

Отметим: сдвиг по фазе между I и U в цепи с резистором $\varphi = \psi_i - \psi_u = 0$.

Мгновенное значение мощности

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m I_m \sin^2(\omega t + \psi_u) = U_m I_m \frac{1 - \cos(2\omega t + \psi_u)}{2} = \\ &= UI - UI \cos(2\omega t + \psi_u). \end{aligned}$$

При $\psi_u = 0$ построены временные диаграммы на рис. 4.12.

Так как за период $\cos(2\omega t + \psi_u) = 0$, то $P_{\text{ср}} = UI = IRI = RI^2 = P$, Вт, т. е. *среднее* значение мощности $P_{\text{ср}}$ равно активной мощности в цепи P .

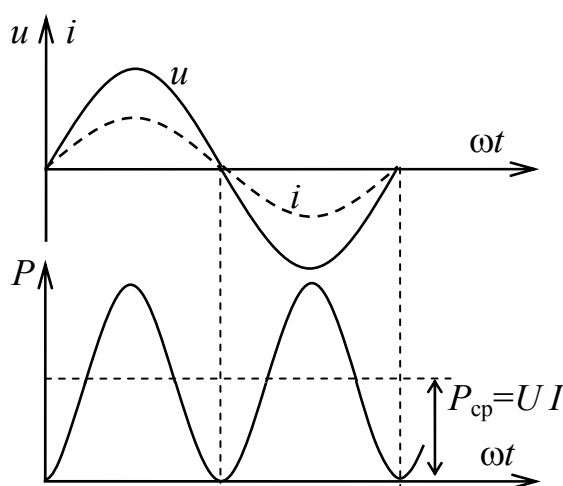


Рис. 4.12. Временные диаграммы u , i , P

Отметим: 1. Мгновенная мощность p изменяется с двойной частотой, как видно из рис. 4.12.

2. Независимо от направления тока энергия передается в одном направлении – от источника к приемнику, где она преобразуется в тепло или в другой вид энергии.

3. Вектор тока совпадает с вектором напряжения, т. е. $\underline{U} = R \underline{I}$.

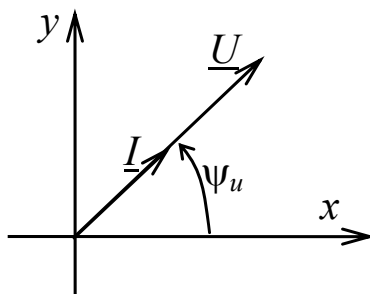
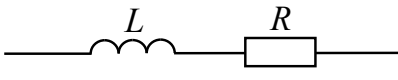


Рис. 4.13. Совпадение векторов \underline{I} и \underline{U}

Если к зажимам цепи на рис. 4.11 приложено постоянное напряжение U , то будет: ток $I = \frac{U}{R}$ и $P = U I = R I^2$.

Отметим: форма уравнений закона Ома постоянного тока, переменного тока (действующее значение) одинакова!

4.5. Электрическая цепь с идеальной индуктивностью

Реальная катушка, намотанная проводом, всегда имеет индуктивность L и активное сопротивление r . И поэтому на низкой частоте в схеме замещения отображается как  (на высокой частоте надо еще учитывать межвитковую емкость). Идеальная индуктивность L в схеме замещения дает возможность при анализе электрической цепи учитывать явление самоиндукции и явление накопления энергии в магнитном поле.

Рассмотрим явления, происходящие в идеальной индуктивности при прохождении по ней синусоидального тока (приблизительно идеальную индуктивность можно получить, если намотать большое количество витков толстым проводом так, чтобы можно было пренебречь активным сопротивлением $r \rightarrow 0$).

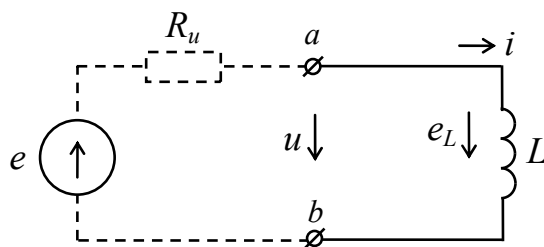


Рис. 4.14. Цепь с идеальной индуктивностью

По цепи протекает синусоидальный ток $u = |e_L|$. При этом он наводит ЭДС самоиндукции в индуктивности $e_L = -L \frac{di}{dt}$.

После преобразований получим в синусоидальной форме

$$e_L = E_{mL} \sin(\omega t + \psi_e), \quad (4.5)$$

где амплитуда $E_{mL} = \omega L I_m$, фаза (начальная при $t = 0$) $\psi_e = \psi_i - \frac{\pi}{2}$, так как e_L отстает от тока i на $\frac{\pi}{2}$.

Разделив $\frac{E_{mL}}{\sqrt{2}}$ и $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$, получим действующее значение ЭДС самоиндукции

$$E_L = \omega L I. \quad (4.6)$$

Отметим: E_L отстает по фазе от тока на угол $\varphi = \frac{-\pi}{2}$.

Для цепи на рис. 4.14 составим уравнение по второму закону Кирхгофа $u_L + e_L = 0$, где $u_L = u$.

Следовательно, $u = u_L = -e_L$, т. е. напряжение на индуктивности u_L опережает ЭДС e_L на 180°

$$u_L = U_{mL} \sin(\omega t + \psi_u),$$

где амплитуда $U_{mL} = \omega L I_m$, фаза $\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}$, или, в действующих значениях, $U_L = \omega L I$, где $\omega L = X_L$ — индуктивное сопротивление, Ом.

Тогда закон Ома для действующих значений

$$I = \frac{U_L}{X_L}. \quad (4.7)$$

На рис. 4.15 показана векторная диаграмма цепи с идеальной индуктивностью.

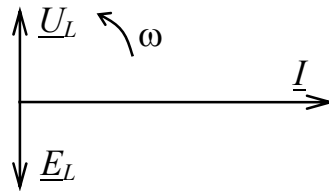


Рис. 4.15. Векторная диаграмма

Отметим: 1. Напряжение на идеальной индуктивности U_L опережает по фазе ток на $\frac{\pi}{2}$ (на 90°) (см. рис. 4.15 и 4.16).

2. ЭДС самоиндукции и напряжение на идеальной индуктивности равны по величине, т. е. $u = |e_L|$.

3. Произведение ωL имеет размерность сопротивления и называется реактивным индуктивным сопротивлением x_L , Ом.

Мгновенное значение мощности p_L в цепи с идеальной индуктивностью

$$p_L = u_L i = U_{mL} I_m \sin\left(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}\right) \sin(\omega t + \psi_i) = U_L I \sin(2\omega t + \psi_i).$$

Построим временные диаграммы для $\psi_i = 0$.

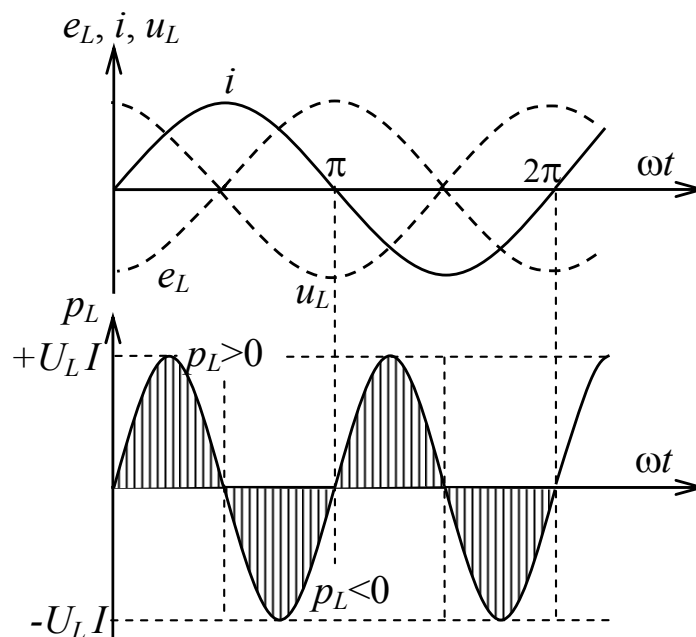


Рис. 4.16. Временные диаграммы

Отметим: 1. Мгновенная мощность p_L изменяется с двойной частотой от величины $+U_L I$ до величины $-U_L I$.

2. Когда абсолютное значение мгновенного тока нарастает, энергия от источника поступает в индуктивность, и затрачивается на создание магнитного поля (запасается в виде энергии магнитного поля). Когда абсолютное значение тока убывает, то энергия магнитного поля возвращается источнику (выполняется закон сохранения энергии).

3. Активная мощность $P = P_{\text{ср}} = 0$.

Таким образом, в цепи с *идеальной индуктивностью* происходит *обмен энергией без потерь* между источником и магнитным полем в индуктивности.

Амплитуду колебаний мощности называют реактивной индуктивной мощностью $Q_L = U_L I = x_L I^2$ вар (вольт-ампер-реактивный).

Если к зажимам $a-b$ цепи на рис. 4.14 приложить постоянное напряжение, при котором $\omega = 0$, то тогда сопротивление цепи $x_L = \omega L = 0$ и $R_L = 0$ (так как индуктивность идеальная). Следовательно, $U_L = x_L I = 0$, $I = \frac{E}{R_u}$, $P = 0$, $P_{\text{ист}} = I^2 R_u$. В цепи будет корот-

кое замыкание, как показано на рис. 4.17. А так как внутреннее сопротивление источника R_u мало, то источник может сгореть.

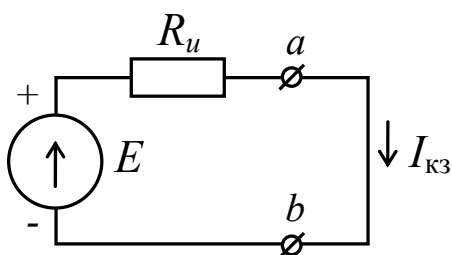


Рис. 4.17. Идеальная индуктивность на постоянном токе

4.6. Электрическая цепь с идеальной емкостью

Емкостной элемент вводится в схему замещения реальной цепи для учета влияния изменяющегося *электрического поля в реальном конденсаторе* и в других реальных емкостях. Часто реальный конденсатор с хорошим диэлектриком замещают *идеальной емкостью*.

Пусть к идеальной емкости на рис. 4.18 подведено напряжение $u = u_C = U_{m_c} \sin(\omega t + \psi_u)$.

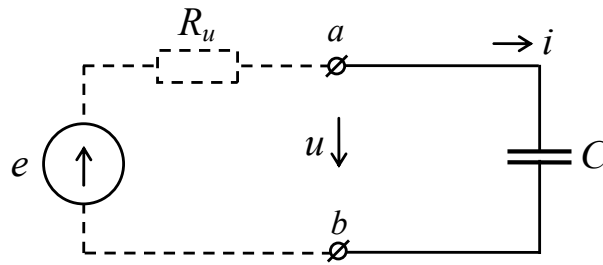


Рис. 4.18. Цепь с идеальной емкостью

Тогда ток в цепи с конденсатором будет

$$i = C \frac{du_C}{dt}.$$

После преобразований получим в синусоидальной форме

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (4.8)$$

где амплитуда тока $I_m = \omega C U_{m_c}$; начальная фаза $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$, так как ток в емкости опережает напряжение.

$$\text{Для действующих значений } I = \omega C U_C = \frac{U_C}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_C}{x_C}.$$

Следовательно, закон Ома для действующих значений

$$I = \frac{U_C}{x_C}, \quad (4.9)$$

а

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.10)$$

– реактивное емкостное сопротивление, Ом.

На рис. 4.19 приведена векторная диаграмма цепи с идеальной емкостью.

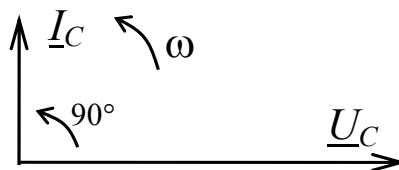


Рис. 4.19. Векторная диаграмма

Как видим из диаграммы, вектор тока в идеальной емкости опережает вектор напряжения на 90° , ($\varphi = \frac{\pi}{2}$).

Мгновенное значение мощности

$$p_C = u_C i = U_C I \sin(2\omega t + \psi_u).$$

На рис. 4.20 приведены временные диаграммы тока i , напряжения u и мгновенной мощности p_C .

Графики при $\psi_u = 0$.

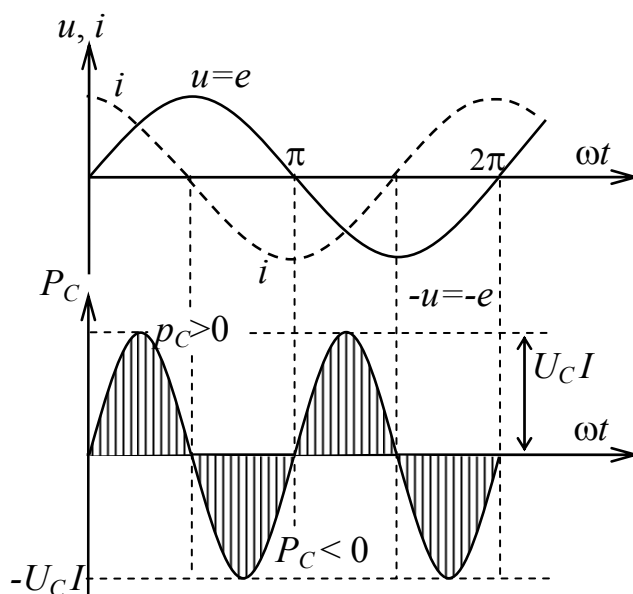


Рис. 4.20. Графики u , i , P_C

Отметим: 1. Ток i опережает по фазе напряжение u на угол $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

2. P_C изменяется с двойной частотой.

3. Когда $|u|$ нарастает, то энергия от источника поступает в конденсатор для создания электрического поля (запасается в виде энергии электрического поля). Когда $|u|$ уменьшается, то энергия электрического поля возвращается источнику. При этом $P_{\text{ср}} = P = 0$.

Таким образом, в идеальной емкости происходит обмен энергией без потерь. В реальном конденсаторе $P \neq 0$ — есть некоторые потери.

Амплитуду колебаний мощности называют реактивной емкостной мощностью

$$Q_C = U_C I = x_C I^2 \text{ вар.} \quad (4.12)$$

Если к зажимам $a-b$ цепи на рис. 4.18 приложено постоянное напряжение, т. е. $\omega = 0$, то $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty$ – разрыв цепи (рис. 4.21).

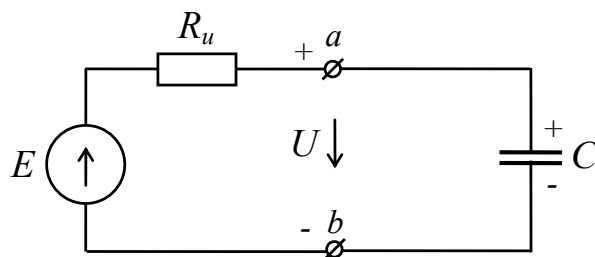


Рис. 4.21. Цепь с идеальной емкостью на постоянном токе

Следовательно,
$$I = \frac{E}{R_u + \infty} = 0, \quad U = E - I R_u = E - 0 \cdot R_u = E,$$

 $P = 0$, т. е. цепь работает в режиме холостого хода, $U_{xx} = E$.

4.7. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-L$

Рассмотрим цепь с резистивным и индуктивным элементами. Это может быть просто реальная индуктивность, или резистор и индуктивность. Схема замещения такой цепи показана на рис. 4.22.

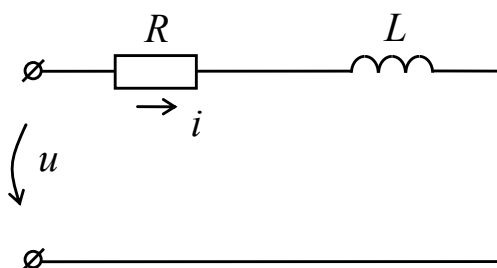


Рис. 4.22. Цепь $R-L$

Пусть по цепи протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Для упрощения расчета и анализа перейдем к изображению тока в действующих значениях, $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение тока.

Тогда схема замещения будет как на рис. 4.23.

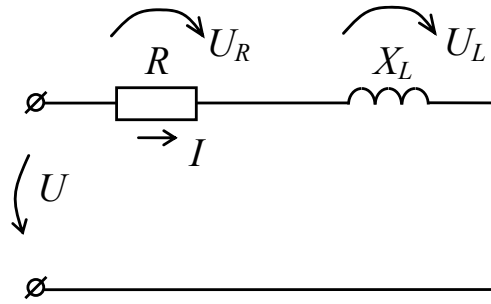


Рис. 4.23. Цепь R – X_L

Составим уравнение электрической цепи по второму закону Кирхгофа в векторной форме

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L. \quad (4.14)$$

Как известно, вектор напряжения на активном сопротивлении \underline{U}_R совпадает по направлению с вектором тока \underline{I} (см. рис. 4.13), а вектор напряжения на идеальной индуктивности опережает вектор тока \underline{I} на $\frac{\pi}{2}$ (см. рис. 4.15). Следовательно, векторная диаграмма по уравнению (4.14) будет иметь вид, как показано на рис. 4.24.

Но ток в цепи на рис. 4.23 протекает один I . Следовательно, $U_R = I R$, а $U_L = I X_L$. Это означает, что сдвиг по фазе φ между векторами \underline{U} и \underline{I} определяют величины R и X_L в треугольнике сопротивлений на рис. 4.25.

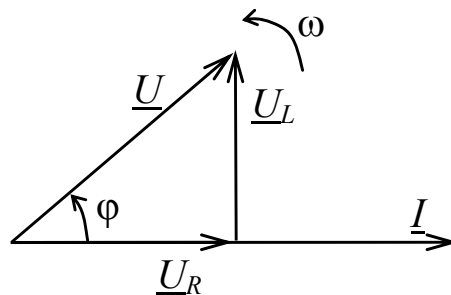


Рис. 4.24. Векторная диаграмма цепи R – L

Векторная диаграмма вращается против часовой стрелки со скоростью ω .

Сдвиг по фазе на угол φ определяет соотношение между значениями R и L в электрической цепи, что видно из треугольника сопротивлений, показанной на рис. 4.25.

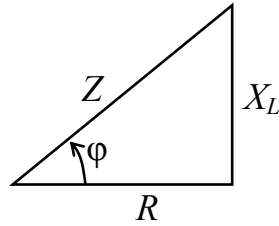


Рис. 4.25. Треугольник сопротивлений

Упростим схему, изображенную на рис. 4.23.

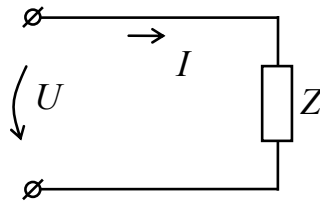


Рис. 4.26. Цепь Z

Тогда $I = \frac{U}{Z}$, где $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ из треугольника на рис. 4.25.

Возвращаемся к схеме рис. 4.23 и определяем $U_R = I R$ и $U_L = I X_L$, а сдвиг по фазе $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$ из треугольника сопротивлений на схеме рис. 4.25.

Рассмотрим пример по расчету цепи на рис. 4.22.

Пусть известно $U_m = 100$ В, $R = 100$ Ом, $L = 0,5$ Гн, $f = 50$ Гц.

Произведем расчет цепи, изображенной на рис. 4.23, в действующих значениях.

1. Определим $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$,

где $X_L = \omega L = 2 \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 = 157$ Ом.

Тогда $Z = \sqrt{100^2 + 157^2} = \sqrt{44649} = 186$ Ом.

2. Действующее значение $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{100}{\sqrt{2}} = 71$ В.

3. Действующее значение тока $I = \frac{U}{Z} = \frac{71}{186} = 0,38$ А.

4. Сдвиг по фазе $\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} = \arctg \frac{157}{100} = \arctg 1,57 = 54^\circ$.

5. Активная мощность $P = I^2 R = 0,38^2 \cdot 100 = 0,146 \cdot 100 = 14,6$ Вт.

6. Реактивная мощность $Q = I^2 X = 0,38^2 \cdot 157 = 0,146 \cdot 157 = 23$ вар.

Проверим: полная мощность $S = UI = 71 \cdot 0,38 = 27$ ВА (вольт-ампер), или баланс мощностей $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{14,6^2 + 23^2} = 27$ ВА. Баланс мощностей выполняется.

7. $U_R = IR = 0,38 \cdot 100 = 38$ В, $U_L = IX_L = 0,38 \cdot 157 = 60$ В.

8. Построим векторную диаграмму цепи $R-L$.

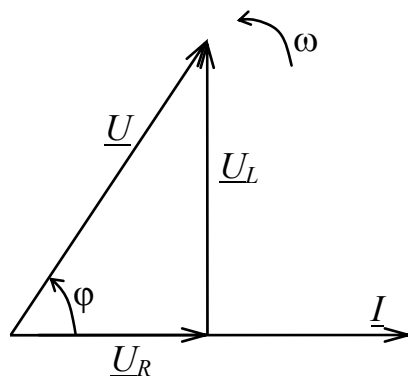


Рис. 4.27. Векторная диаграмма рассчитанной цепи $R-L$

9. При включении цепи $R-L$ на постоянный ток I , у которого частота $f = 0$, то $\omega = 0$ и, следовательно, $X_L = 0$. В этом случае $I = \frac{U}{R}$ и $\varphi = 0$, т. е. U и I совпадают по направлению.

4.8. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-C$

Схема замещения такой цепи показана на рис. 4.28.

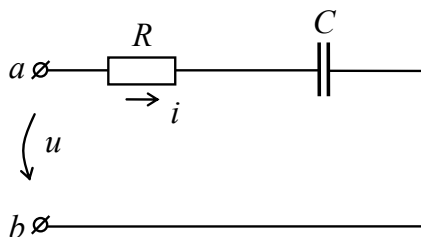


Рис. 4.28. Цепь $R-C$

Пусть по цепи протекает электрический ток, мгновенное значение которого определяется уравнением $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, а $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ – действующее значение тока. Схема замещения в действующих значениях показана на рис. 4.29.

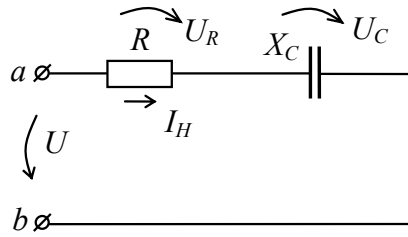


Рис. 4.29. Цепь $R-X_C$

Составим уравнение этой электрической цепи по второму закону Кирхгофа в векторной форме

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C. \quad (4.15)$$

Построим векторную диаграмму напряжений по схеме на рис. 4.29.

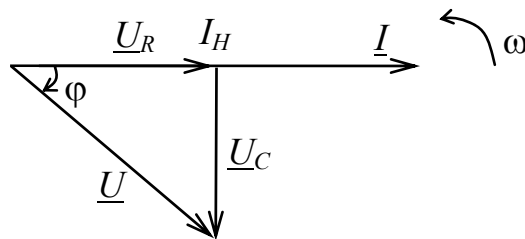


Рис. 4.30. Векторная диаграмма цепи $R-C$

Из векторной диаграммы (рис. 4.30) и схемы на рис. 4.29

$$R = \frac{U_R}{I_H}, \quad X_C = \frac{U_C}{I_H}, \quad Z = \frac{U}{I_H}$$

определяем треугольник сопротивлений.

Упростим схему (рис. 4.31).

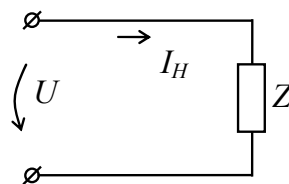


Рис. 4.31. Упрощенная схема

В схеме

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}, \quad (4.16)$$

где $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Тогда $I = \frac{U}{Z}$, а сдвиг по фазе между током и напряжением $\varphi = \arctg \frac{X_C}{R}$.

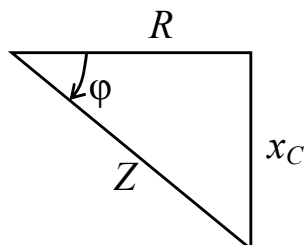


Рис. 4.32. Треугольник сопротивлений

Величину сдвига по фазе на угол φ определяет соотношение между значениями R и C в электрической цепи, что видно из треугольника сопротивлений, показанной на рис. 4.32.

Пусть в цепи на рис. 4.28 известно: $u = 310 \sin \omega t$, $\omega = 314$ рад/с, $R = 200$ Ом, $C = 10$ мкФ. Необходимо определить: ток I , U_R , U_C , мощности P , Q_C .

1. Определим действующее значение напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{310}{\sqrt{2}} = 220 \text{ В.}$$

2. Определим емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{314 \cdot 10} = 320 \text{ Ом.}$$

3. Определим полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{200^2 + 320^2} = 375 \text{ Ом.}$$

4. Определим ток $I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{375} = 0,585 \text{ А.}$

5. Определим напряжение на активном сопротивлении

$$U_R = I R = 0,585 \cdot 200 = 117 \text{ В.}$$

6. Определим напряжение на емкостном сопротивлении

$$U_C = I X_C = 0,585 \cdot 320 = 187 \text{ В.}$$

7. Определим активную мощность

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R = 0,585^2 \cdot 200 = 68,4 \text{ Вт.}$$

8. Определим реактивную емкостную мощность

$$Q_C = UI \sin \varphi = I^2 X_C = 0,585^2 \cdot 320 = 96 \text{ Вт.}$$

9. Определим сдвиг по фазе φ

$$\varphi = \arctg \frac{X_C}{R} = \arctg \frac{320}{200} = 58^\circ.$$

10. Определим полную мощность цепи

$$S = UI = 220 \cdot 0,585 = 117 \text{ ВА.}$$

11. $P = S \cos \varphi = 117 \cdot 0,53 = 68 \text{ Вт;}$

$$Q_C = S \sin \varphi = 117 \cdot 0,83 = 96 \text{ Вт;}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2} = \sqrt{68^2 + 96^2} = 117 \text{ ВА.}$$

Баланс мощностей выполняется.

Подключим к цепи R – C (см. рис. 4.28) источник постоянного тока напряжением U , как показано на рис. 4.33.

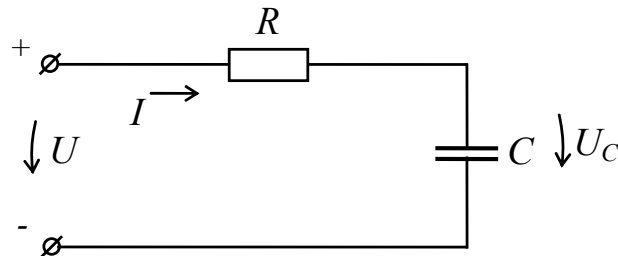


Рис. 4.33. Цепь R – C на постоянном токе

Так как частота $f = 0$ (на постоянном токе), то сопротивление емкости будет

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 0 \cdot C} = \infty.$$

Следовательно, ток $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \infty^2}} = 0$.

Тогда $U_C = U - U_R = U - I R = U - 0 \cdot R = U$. Следовательно, на постоянном токе емкость представляет собой разрыв цепи со всеми вытекающими из этого последствиями $I = 0$, $U_R = 0$, $U_C = U$.

4.9. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-L-C$

Рассмотрим более общую цепь, содержащую реальную катушку (индуктивность), конденсатор и резисторы (рис. 4.34).

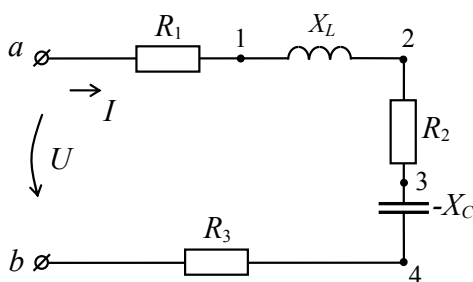


Рис. 4.34. Схема замещения цепи $R-L-C$

Упростим схему замещения (рис. 4.35).

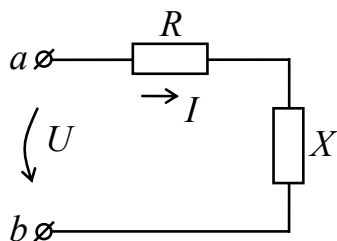


Рис. 4.35. Упрощенная схема замещения цепи $R-L-C$

На схеме рис. 4.35: $R = R_1 + R_2 + R_3$, $X = X_L - X_C$. Далее упрощаем схему (рис. 4.36).

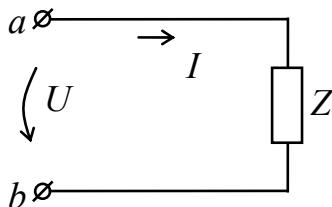


Рис. 4.36. Упрощенная схема по рис. 4.34

Здесь $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$.

Покажем расчет такой цепи на конкретном примере. Пусть нам известно: $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, где $U_m = 200$ В, $\omega = 2\pi f = 2\pi 50$, $\psi_u = 0$, $R_1 = 20$ Ом, $L_1 = 0,2$ Гн, $R_2 = 10$ Ом, $C = 100$ мкФ, $R_3 = 30$ Ом. Необходимо определить ток I , напряжения U_1, U_2, U_3 , мощности $P_1, P_2, P_3, Q_1, Q_2, S$.

1. Определим $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ на рис. 4.36, 4.35.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 20 + 10 + 30 = 60 \text{ Ом (см. рис. 4.34).}$$

$$X_1 = \omega L = 314 \cdot 0,2 = 62,8 \text{ Ом;}$$

$$X_2 = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{31,4 \cdot 10^{-3}} = 31,8 \text{ Ом;}$$

$$X = X_1 - X_2 = 62,8 - 31,8 = 31 \text{ Ом на рис. 4.34.}$$

$$\text{Тогда } Z = \sqrt{60^2 + 31^2} = 67,5 \text{ Ом,}$$

$$\text{где } \varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{31}{60} = \varphi = \arctg 0,516 = 27,3^\circ.$$

2. Определим действующее значение напряжения:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{200}{1,41} = 142 \text{ В.}$$

3. Определим действующее значение тока по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{Z} = \frac{142}{67,3} = 2,11 \text{ А.}$$

4. Определим действующие значения напряжения на участках цепи на рис. 4.34:

$$U_{R_1} = IR_1 = 2,11 \cdot 20 = 42 \text{ В; } U_{X_1} = IX_1 = 2,11 \cdot 62,8 = 132 \text{ В;}$$

$$U_{R_2} = IR_2 = 2,11 \cdot 10 = 21,1 \text{ В; } U_{X_2} = IX_2 = 2,11 \cdot 32 = 68,3 \text{ В;}$$

$$U_{R_3} = IR_3 = 2,11 \cdot 30 = 63,3 \text{ В.}$$

5. Построим векторную диаграмму напряжений относительно общего вектора тока по схеме на рис. 4.34 (обход схемы по направлению тока). Напряжение \underline{U} опережает ток \underline{I} на угол $\varphi \approx 27^\circ$.

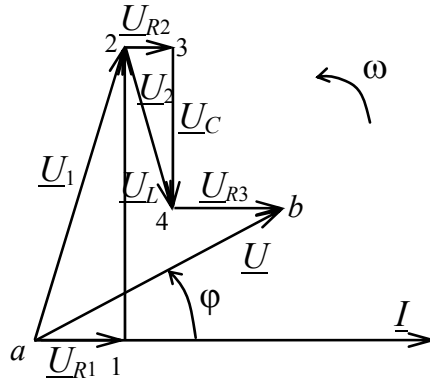


Рис. 4.37. Векторная диаграмма электрической цепи на рис. 4.34

6. Рассчитаем мощности:

$$P_1 = I^2 R_1 = 2,11^2 \cdot 20 = 4,51 \cdot 20 = 91 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I^2 R_2 = 45,1 \text{ Вт}, P_3 = I^2 R_3 = 135 \text{ Вт};$$

$$P = I^2 R = 272 \text{ Вт}, P_1 + P_2 + P_3 = 91 + 45,1 + 135 = 271,1 \text{ Вт};$$

$$Q_1 = I^2 X_1 = 4,51 \cdot 62,8 = 282 \text{ вар};$$

$$Q_2 = I^2 X_2 = 4,51 \cdot 32 = 144 \text{ вар};$$

$$Q = I^2 X = 4,51 \cdot 30,08 = 138 \text{ вар};$$

$$Q = Q_1 - Q_2 = 138 \text{ вар}.$$

Полная мощность, потребляемая от источника,

$$S = UI = 142 \cdot 2,11 = 300 \text{ ВА}, \text{ или } S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{272^2 + 138^2} = 300 \text{ ВА}.$$

Из векторной диаграммы на рис. 4.37 видно, что вся электрическая цепь на рис. 4.34 при соотношении $X_1 > X_2$ имеет индуктивный характер, при котором напряжение \underline{U} опережает вектор тока I .

$Q_1 = 282$ вар больше $Q_2 = 144$ вар, т. е. $Q = Q_1 - Q_2 = 138$ вар – положительна.

А если принять наоборот $X_1 = 32$ Ом, а $X_2 = 62,8$ Ом, т. е. $X_1 < X_2$, то цепь будет иметь емкостный характер, так как $Q = -138$ ВА, и векторная диаграмма будет иметь вид, показанный на рис. 4.38.

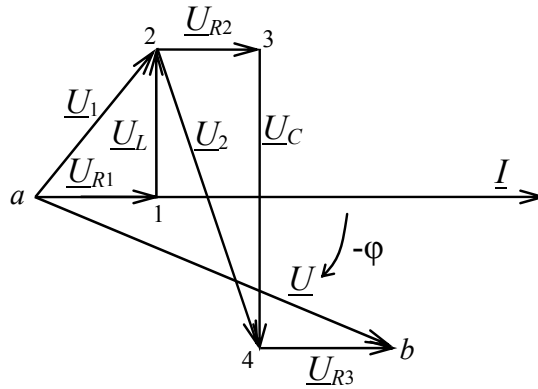


Рис. 4.38. Векторная диаграмма цепи при $X_2 > X_1$

Если же к электрической цепи, показанной на рис. 4.34, подключить источник постоянного тока, то ток $I = 0$, так как $X_2 = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty$, а напряжение U будет сосредоточено на обкладках конденсатора C .

4.10. Резонанс напряжений

В общем случае: резонанс – это совпадение частоты колебаний тела или системы с частотой колебаний внешних сил.

В электротехнике резонансом называется такое явление в цепях переменного тока, при котором наблюдается совпадение частоты колебаний тока источника (питающей сети) с собственной частотой колебаний электрической цепи (цепь называют колебательным контуром).

Любую цепь с последовательно соединенными R , L , C можно преобразовать к схеме замещения, показанной на рис. 4.39.

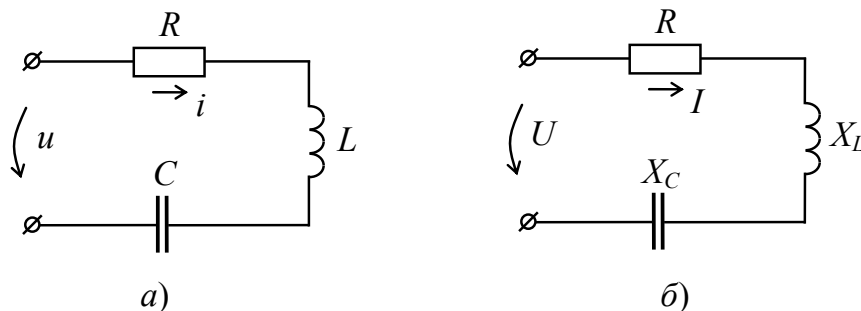


Рис. 4.39. Электрическая цепь $R-L-C$

При выполнении условия резонанса $X_L = X_C$ в последовательной электрической цепи возникает резонанс напряжений, при котором $U_L = U_C$, так как $X_L I = X_C I$.

Из условия резонанса определяется резонансная частота. Так как $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ – условие резонанса, то, следовательно, резонансная частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.17)$$

Условия резонанса можно достичь, изменяя ω , или L , или C .

При резонансе напряжений наблюдаются следующие явления:

1. Электрическая цепь по отношению к источнику проявляет себя как активная цепь. Действительно, $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$, т. е. сдвиг по фазе между током и напряжением $\varphi = 0$.

2. Ток в цепи $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R}$ – максимальный.

3. По закону Ома напряжение $U = IZ = IR$, $U_L = IX_L$, $U_C = IX_C$. Если окажется, что $X_L = X_C \gg R$, то $U_L = U_C \gg U$, т. е. в цепи появится перенапряжение, что может оказаться опасным для изоляции в индуктивности и в емкости.

4. Так как цепь по отношению к источнику проявляет себя как активная цепь ($Z = R$), то от источника поступает только активная мощность. Действительно, $S = ZI^2 = RI^2 = P$.

Следовательно, при резонансе напряжений происходит полный обмен энергией между емкостью и индуктивностью цепи с частотой

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, или $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. При этом энергия электрического поля

при разрядке конденсатора затрачивается на создание магнитного поля индуктивной катушки, а при уменьшении тока энергия магнитного поля катушки будет уменьшаться, расходуясь на создание электрического поля конденсатора, т. е.

$$\frac{CU^2}{2} \leftrightarrow \frac{LI^2}{2}.$$

Таким образом, происходит непрерывное превращение энергии электрического поля в энергию магнитного поля, и наоборот.

Векторная диаграмма напряжений в электрической цепи при резонансе напряжений приведена на рис. 4.40.

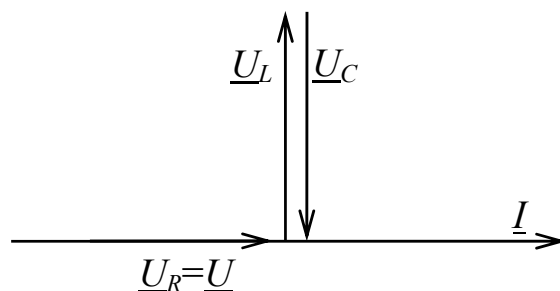


Рис. 4.40. Векторная диаграмма напряжений

Зависимость тока и напряжения от частоты, $I = f(\omega)$ и $U = f(\omega)$, называется частотной характеристикой. На рис. 4.41 показаны частотные характеристики тока и напряжений, где при резонансе $\omega = \omega_0$, $U_{C0} = U_{L0} = U_0$, $I = I_0$.

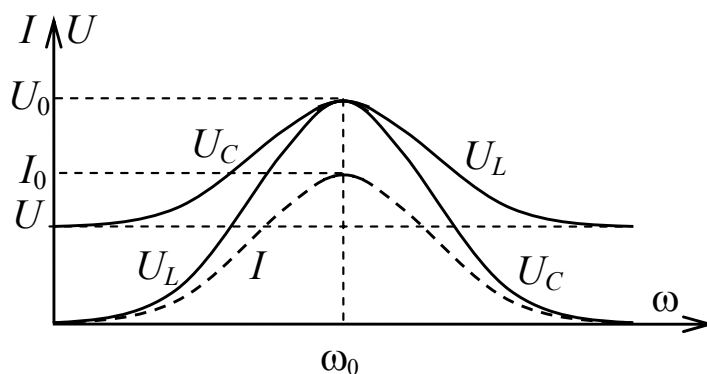


Рис. 4.41. Частотные характеристики

Значение резонанса напряжений:

1. В электроэнергетических устройствах часто нежелателен, так как может привести к пробое изоляции.
2. В электронике, связи, радио, автоматике – полезен: колебательные контуры настраивают на нужную частоту – получают частотные фильтры и другие устройства электроники.

4.11. Электрическая цепь с параллельно соединенными приемниками

Мы с вами в § 4.7 и 4.8 рассмотрели анализ и расчет электрической цепи с последовательно соединенными приемниками $R-L$ (см. рис. 4.23) и $R-C$ (см. рис. 4.28). А теперь обе эти цепи $R-L$ и $R-C$ подключим к одному источнику $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, соединив эти приемники параллельно. Такое подключение приемников очень ши-

роко используется. И не только по 2 приемника. В каждом доме по несколько квартир подсоединяют к одной фазе, да и в каждой квартире еще включают параллельно различные приемники электрической энергии к одной фазе городской сети.

Рассмотрим анализ и расчет цепи с двумя параллельно включенными приемниками R_1-X_L и R_2-X_C , схема замещения которой приведена на рис. 4.42.

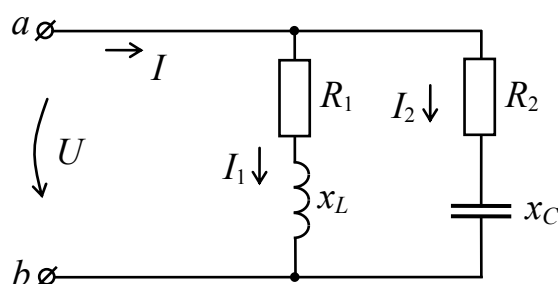


Рис. 4.42. Схема замещения цепи с параллельно-соединенными приемниками

Следует заметить, что мы уже рассмотрели ветвь R_1-X_L в § 4.7, а вторую ветвь R_2-X_C в § 4.8 как отдельные цепи. Здесь они соединены параллельно в одной цепи, но методика анализа и расчета похожи.

Упростим схему замещения ветвей (приемников).

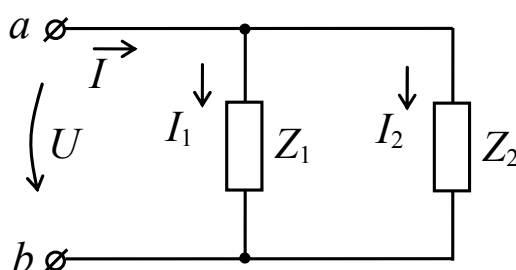


Рис. 4.43. Упрощенная схема замещения цепи

Обычно бывают известны параметры элементов цепи. Поэтому можно определить полное сопротивление ветвей упрощенной схемы $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$, а сдвиг по фазе между током и напряжением в ветви $\varphi_1 = \arctg \frac{X_1}{R_1}$. Аналогично, $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$, $\varphi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}$.

Зная полное сопротивление цепи, по закону Ома можно определить токи в ветвях $I_1 = \frac{U}{Z_1}$ и $I_2 = \frac{U}{Z_2}$. А зная сдвиг по фазе φ_1 и φ_2

этих токов относительно вектора напряжения \underline{U} , можно определить эти токи в векторной форме, т. е. определить их активную составляющую $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$, $I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2$ и реактивную составляющую $I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1$, $I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2$, из треугольников тока.

По первому закону Кирхгофа общий ток $\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$. А это значит, что активная часть вектора общего тока $I_a = I_{a1} + I_{a2}$, а также реактивная часть этого общего тока $I_p = I_{p1} + I_{p2}$.

Тогда из треугольника токов определяем величину тока $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$ и сдвиг по фазе между током I и напряжением U $\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a}$.

Построим векторную диаграмму токов относительно вектора \underline{U} для случая, когда $I_1 > I_2$ и $\varphi_1 > \varphi_2$ (рис. 4.44).

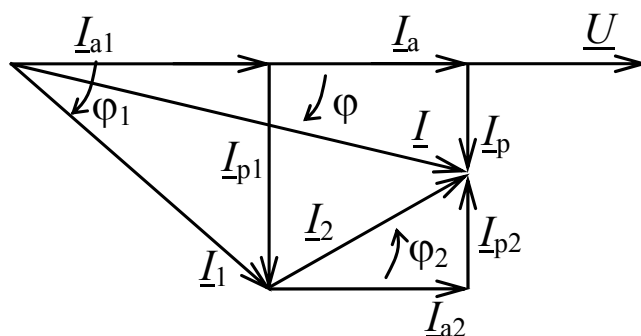


Рис. 4.44. Векторная диаграмма токов

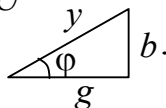
Из векторной диаграммы на рис. 4.44 видно, что реактивный индуктивный ток I_{p1} больше емкостного I_{p2} , и поэтому ток I отстает от напряжения на величину $\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a}$. Сопротивление всей цепи

$Z = \frac{U}{I}$, а $R = Z \cos \varphi$, $X = Z \sin \varphi$ – из треугольника.

Как видим из векторных диаграмм, мы получили три треугольника токов: первой ветви R_1-X_L , второй ветви R_2-X_C и всей цепи $R-X$.

Из этих треугольников можно получить уравнения $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$, $I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1$, $I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2$, $I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2$, $I_a = I \cos \varphi$, $I_p = I \sin \varphi$, а $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$.

Если все стороны треугольника разделить на напряжение U , то получим новый треугольник – треугольник проводимостей: $y = \frac{I}{U}$ – проводимость всей цепи, $g = \frac{I_a}{U}$ – активная проводимость, $b = \frac{I_p}{U}$ – реактивная проводимость, т. е.



Отсюда

$$y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = y \cos \varphi, \quad b = y \sin \varphi. \quad (4.18)$$

Аналогично получим треугольник проводимостей и для первой и второй ветвей цепи:

$$y_1 = \frac{I_1}{U}, \quad g_1 = \frac{I_{a1}}{U}, \quad b_1 = \frac{I_{p1}}{U}, \quad y_2 = \frac{I_2}{U}, \quad g_2 = \frac{I_{a2}}{U}, \quad b_2 = \frac{I_{p2}}{U}. \quad (4.19)$$

Из схемы замещения на рис. 4.42 видим, что ток I_{p1} , протекая через индуктивность, создает магнитное поле, в котором запасается энергия. Ток I_{p2} , протекая через емкость, создает электрическое поле, в котором тоже запасается энергия. Эти токи сдвинуты по фазе между собой на 180° (противоположны). Поэтому энергия магнитного поля расходуется на создание электрического поля конденсатора, и, наоборот, по контуру двух ветвей. Но энергии электрического поля конденсатора недостаточно для создания всего магнитного поля индуктивности. Поэтому недостающую часть энергии индуктивности создает реактивный ток I_p источника. А полезную работу, т. е. необратимые потери энергии источника, совершают активные токи I_{a1} и I_{a2} .

Произведем расчет цепи на рис. 4.42 для конкретных значений ее параметров: $U_m = 310$ В, $f = 50$ Гц, $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с, начальная фаза напряжения $\psi_u = 0$, $R_1 = R_2 = 20$ Ом, $L_1 = 0,2$ Гн, $C = 100$ мкФ = $100 \cdot 10^{-6}$ Ф.

1. Упрощаем схему, как на рис. 4.43. Для этого:

а) определим действующее значение напряжения

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{310}{\sqrt{2}} = 220 \text{ В};$$

б) определим полное сопротивление ветвей:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 314 \cdot 0,2 = 62,8 \text{ Ом. Тогда}$$

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 62,8^2} = 66 \text{ Ом};$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1} = \arctg \frac{62,8}{20} = 72^\circ;$$

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = -32 \text{ Ом.}$$

$$\text{Тогда } Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_C^2} = \sqrt{20^2 + 32^2} = 37,8 \text{ Ом};$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{-X_C}{R_2} = \arctg \frac{-32}{20} = -58^\circ;$$

в) определим токи в ветвях на рис. 4.43 по закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{220}{66} = 3,4 \text{ А}, \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{220}{37,8} = 5,8 \text{ А}.$$

Определим активные составляющие токов в ветвях:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 3,4 \cos 72^\circ = 3,4 \cdot 0,309 = 1,1 \text{ А};$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 5,8 \cos 58^\circ = 5,8 \cdot 0,53 \approx 3,1 \text{ А}.$$

Определим реактивные составляющие токов в ветвях:

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = 3,4 \sin 72^\circ = 3,4 \cdot 0,95 = 3,23 \text{ А};$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 5,8 \sin(-58^\circ) = 5,8(-0,85^\circ) = -4,94 \text{ А}.$$

Активная составляющая общего тока $I_a = I_{a1} + I_{a2} = 1,1 + 3,1 = 4,2 \text{ А}$,
а реактивная составляющая $I_p = I_{p2} - I_{p1} = -3,23 + 4,94 = 1,71 \text{ А}$.

$$\text{Тогда общий ток } I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{4,2^2 + 1,71^2} = 4,5 \text{ А}.$$

Построим векторную диаграмму токов для нашего примера (рис. 4.45).

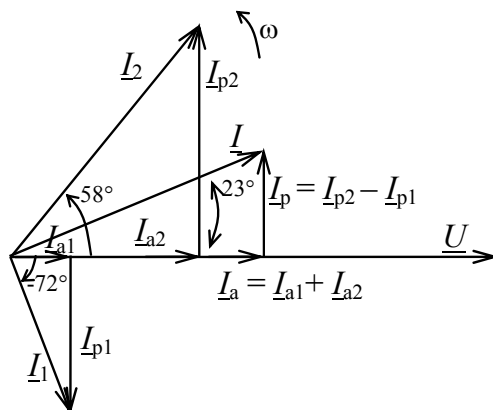


Рис. 4.45. Векторная диаграмма токов

Здесь в примере ток конденсатора реактивный I_{p2} больше реактивного тока индуктивности I_{p1} . Поэтому общий ток I опережает напряжение U .

Определим мощность и проверим баланс мощностей.

Активные $P_1 = I_1^2 R_1 = 3,4^2 \cdot 20 = 230$ Вт;

$P_2 = I_2^2 R_2 = 5,8^2 \cdot 20 \approx 680$ Вт, $P = P_1 + P_2 = 230 + 680 \approx 910$ Вт;

$P = I^2 R = 4,5^2 \cdot 44 = 900$ Вт.

Баланс активной мощности выполняется.

Реактивные $Q_1 = I_1^2 X_1 = 3,4^2 \cdot 62,8 = 730$ вар;

$Q_2 = I_2^2 X_2 = 5,8^2 \cdot 32 = 1140$ вар;

$Q = Q_1 - Q_2 = 730 - 1140 = -410$ вар;

$Q = I^2 X = 4,5^2 (-20) = -410$ вар.

Баланс реактивной мощности выполняется.

4.12. Резонанс токов

В § 4.10 мы рассмотрели общее понятие резонанса и резонанс напряжений в электрической цепи с последовательно соединенными приемниками, имеющими емкость и индуктивность.

В цепи с параллельно соединенными приемниками, которые имеют емкость и индуктивность, как, например, в § 4.11, тоже может возникнуть резонанс. Только это будет резонанс токов.

Рассмотрим схему замещения предыдущего параграфа на рис. 4.42. Для удобства анализа мы повторим ее и в этом параграфе (рис. 4.46).

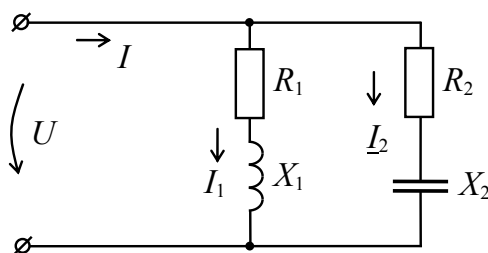


Рис. 4.46. Схема замещения цепи с параллельным соединением приемников

Вспомним, что при резонансе происходит полный обмен энергией между емкостью и индуктивностью. При этом энергия электрического поля при разрядке конденсатора затрачивается на создание магнитного поля индуктивности, а при уменьшении тока в индуктивности энергия магнитного поля затрачивается на создание электрического поля конденсатора. Следовательно, при резонансе токов должны быть равными реактивные токи $I_{p1} = I_{p2}$. Поэтому такой резонанс называется резонансом токов. Но $I_{p1} = b_1 U = b_L U$, а $I_{p2} = b_2 U = b_C U$ [см. уравнение (4.19)]. Следовательно, условие резонанса токов определяется равенством проводимостей индуктивности и емкости, т. е.

$$b_L = b_C. \quad (4.20)$$

Векторная диаграмма и частотная характеристика параллельной цепи при резонансе токов показаны на рис. 4.47 и 4.48.

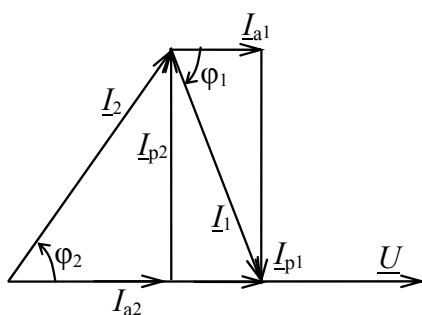


Рис. 4.47. Векторная диаграмма

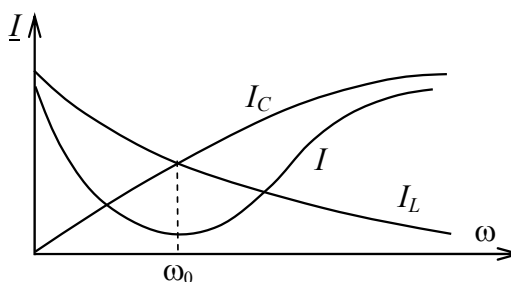


Рис. 4.48. Частотная характеристика

Из векторной диаграммы на рис. 4.47 мы видим:

1. Ток во второй ветви с конденсатором I_2 опережает напряжение U на угол φ_2 , где активная составляющая тока I_{a2} совпадает с направлением напряжения U , а реактивная составляющая I_{p2} опережает напряжение U на 90° .

2. Ток в первой ветви с индуктивностью I_1 отстает от напряжения U на угол φ_1 , где активная составляющая I_{a1} совпадает с направлением напряжения U , а реактивная составляющая I_{p1} отстает от напряжения U на 90° .

3. Так как при резонансе токов $I_{p1} = I_{p2}$, то общий ток источника $I = I_{a1} + I_{a2}$.

Из частотной характеристики мы видим:

1. Резонанс токов $I_C = I_L$ наступает при $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и происходит полный обмен энергией между магнитным полем индуктивности и электрическим полем конденсатора с частотой ω_0 . При этом ток I минимальный.

2. Так как $X_L = \omega L$, то с увеличением ω ток в индуктивности I_{p1} уменьшается.

3. Так как $X_C = \frac{1}{\omega C}$, то с увеличением ω ток в емкости I_{p2} увеличивается.

4. При резонансе токов при ω_0 реактивные токи могут превышать общий ток в цепи I .

5. Резонанс токов безопасен, так как практически трудно создать условия, при которых получилось бы опасное превышение общего тока I реактивными токами.

4.13. Расчет сложных цепей с одним источником

Такие электрические цепи синусоидального тока часто используются как на производстве, так и в быту. В зависимости от степени сложности и структуры приемников энергии расчет цепей осуществляют различными методами. Мы воспользуемся самым простым методом – путем упрощения схемы замещения по известным правилам преобразования схем и использования законов Ома и Кирхгофа. Покажем этот расчет на конкретном примере.

Пусть нам дана конкретная схема замещения, показанная на рис. 4.49.

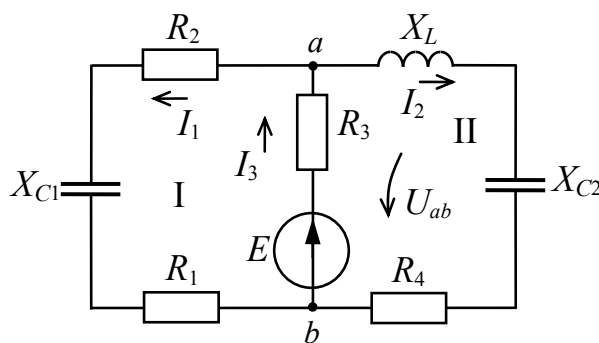


Рис. 4.49. Схема замещения сложной электрической цепи

Известно: ЭДС $E = 230$ В, напряжение между точками $a-b$ $U_{ab} = 220$ В, $f = 50$ Гц, сопротивления $R_1 = R_2 = 10$ Ом, $R_4 = 5$ Ом, индуктивность $L = 0,08$ Гн, емкость $C_1 = C_2 = 200$ мкФ. Необходимо определить токи в ветвях I_1 , I_2 , I_3 , мощности в приемниках, проверить баланс мощностей.

1. Определим сопротивления реактивных элементов:

$$X_{C1} = X_{C2} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = \frac{1}{314 \cdot 200 \cdot 10^{-6}} = 15,9 \text{ Ом};$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot 0,08 = 314 \cdot 0,08 = 25,1 \text{ Ом}.$$

2. Упростим схему (рис. 4.50).

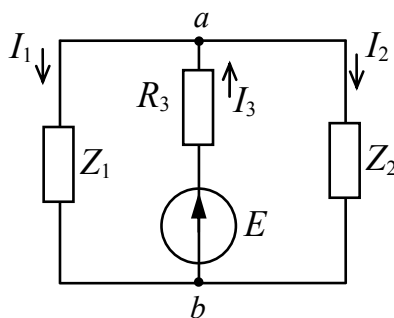


Рис. 4.50. Упрощенная схема замещения

3. Определим сопротивления цепи:

$$Z_1 = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_{C1}^2} = \sqrt{(10 + 10)^2 + 15,9^2} = 25,5 \text{ Ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_4^2 + (X_L - X_{C2})^2} = \sqrt{5^2 + (25,1 - 15,9)^2} = 10,5 \text{ Ом}.$$

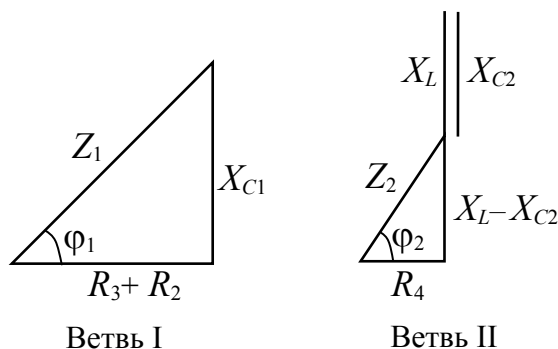


Рис. 4.51. Треугольники сопротивлений

4. Из треугольников сопротивлений определяем сдвиг по фазе между током и напряжением в ветвях I и II (см. рис. 4.49, 4.50):

$$\varphi_1 = \arctg \frac{-X_{C1}}{R_1 + R_2} = \arctg \frac{-15,9}{10+0} = -38,5^\circ.$$

Это означает, что в ветви I вектор напряжения \underline{U}_{ab} отстает от вектора тока \underline{I}_1 на $38,5^\circ$.

$$\varphi_2 = \arctg \frac{(X_L - X_{C2})}{R_4} = \arctg \frac{(25,1-15,9)}{5} = 61,5^\circ.$$

Это означает, что в ветви II вектор напряжения \underline{U}_{ab} опережает вектор тока \underline{I}_2 на $61,5^\circ$.

5. Определим токи в ветвях (см. рис. 4.50):

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{Z_1} = \frac{220}{25,5} = 8,6 \text{ А.}$$

Построим треугольник векторов тока в ветви I (рис. 4.52).

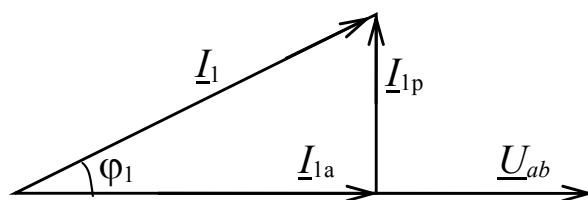


Рис. 4.52. Треугольник-вектор тока ветви I

Решая этот треугольник, определяем:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 = 8,56 \cos 38,5^\circ = 8,56 \cdot 0,78 = 6,68 \text{ А};$$

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 = 8,56 \sin 38,5^\circ = 8,56 \cdot 0,62 = 5,3 \text{ А.}$$

Проверим $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = \sqrt{6,68^2 + 5,3^2} = 8,56 \text{ А.}$

Определим ток в ветви II.

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{Z_2} = \frac{220}{10,5} = 21 \text{ А.}$$

Построим треугольник векторов токов в ветви II (рис. 4.53).

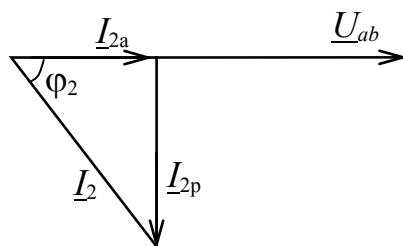


Рис. 4.53. Треугольник векторов тока ветви II

Из рис. 4.53 $I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = 21 \cos 61,5^\circ = 21 \cdot 0,48 = 10,1 \text{ A}$,
 $I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2 = 21 \sin 61,5^\circ = 21 \cdot 0,89 = 18,7 \text{ A}$.

Проверим: $I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2p}^2} = \sqrt{10,1^2 + 18,7^2} = 21 \text{ A}$.

6. Определим токи через источник (III ветвь):

$$I_{3a} = I_{1a} + I_{2a} = 6,68 + 10,1 = 16,78 \text{ A};$$

$$I_{3p} = I_{2p} + I_{1p} = 18,7 - 5,3 = 13,4 \text{ A}.$$

Тогда $I_3 = \sqrt{I_{3a}^2 + I_{3p}^2} = \sqrt{16,78^2 + 13,4^2} = 21,5 \text{ A}$.

7. Определим внутреннее сопротивление источника

$$R_3 = \frac{E - U_{ab}}{I_3} = \frac{230 - 220}{21,5} = 0,47 \text{ Ом}.$$

8. Определим мощности, потребляемые нагрузкой, и потери мощности в источнике. Активные мощности:

$$P_1 = I_1^2 (R_1 + R_2) = 8,56^2 (10 + 10) = 1465,5 \text{ Вт};$$

$$P_2 = I_2^2 R_4 = 21^2 \cdot 5 = 441 \cdot 5 = 2205 \text{ Вт};$$

$$P_3 = I_3^2 R_3 = 21,5^2 \cdot 0,47 = 462 \cdot 0,47 = 217 \text{ Вт}.$$

Реактивные мощности:

$$Q_{1p} = I_1^2 X_{C1} = 8,56^2 \cdot 15,9 = 1165 \text{ вар};$$

$$Q_{2p} = I_2^2 (X_L - X_C) = 21^2 (25,1 - 15,9) = 441 \cdot 9,2 = 4057 \text{ вар}.$$

Полные (кажущиеся) мощности:

$$S_1 = U_{ab} I_1 = 220 \cdot 8,56 = 1883 \text{ ВА, или}$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = \sqrt{1465,5^2 + 1165^2} = 1873 \text{ ВА;}$$

$$S_2 = U_{ab} I_2 = 220 \cdot 21 = 4620 \text{ ВА, или}$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{2205^2 + 4057^2} = 4618 \text{ ВА.}$$

9. Примечания:

1. Расчет сложных цепей постоянного тока производится таким же образом для R (на постоянном токе X_L и X_C отсутствуют, т. е. $X_L = 0$, $X_C = \infty$).

2. В цепи переменного синусоидального тока направление ЭДС выбирают условно. Тогда направления токов будут определяться направлением ЭДС.

4.14. Мощность в цепи синусоидального тока

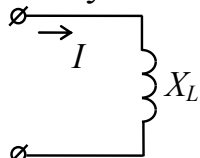
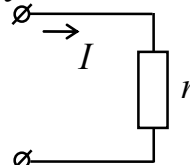
Раньше мы нашли, что активная мощность, учитывающая необ-

ратимые потери энергии в цепи, равна $P = rI^2$, где I – действующее значение тока. В общем случае, когда цепь содержит n активных сопротивлений, то

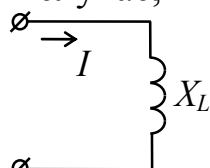
$$P = \sum_{k=1}^n r_k I^2.$$

Реактивная индуктивная мощность, выражающая амплитуду колебаний мощности между источником и индуктивностью (магнитным

полем), $Q_L = X_L I^2$.

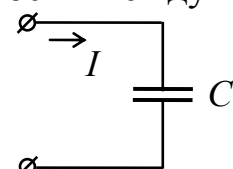


В общем случае, когда цепь содержит m индуктивностей,



$$Q_L = \sum_1^m X_{L_k} I^2.$$

Реактивная емкостная мощность, выражающая амплитуду колебаний мощности между источником и электрическим полем емкости



$$Q_C = X_C I^2.$$

В общем случае, когда цепь содержит ℓ емкостей, $Q_C = \sum_1^{\ell} X_{C_k} I^2.$

$UI = S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – полная мощность.

Следовательно, $P = UI \cos \varphi$, $Q = UI \sin \varphi$.

Итак, $P = UI \cos \varphi$, $Q = UI \sin \varphi$, $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$

P , Q , S имеют одну и ту же размерность. Однако для их различия введены различные единицы измерений:

для P – Вт (кВт, МВт) – ватт, киловатт, мегаватт;

для Q – вар (квар) – вольт-ампер-реактивный, киловольт-ампер-реактивный;

для S – ВА (кВА, МВА) – вольт-ампер, киловольт-ампер, мегавольт-ампер.

Полная мощность S является расчетной мощностью машины, так как эта мощность учитывает напряжение и ток, по величинам которых выбирают электротехнические устройства и аппараты. Мощность S указывается в паспорте.

4.15. Повышение коэффициента мощности в цепях синусоидального тока

Как известно, активная мощность $P = UI \cos \varphi$. При $U = \text{const}$ и $I = \text{const}$ мощность P зависит от $\cos \varphi$, т. е. $\cos \varphi$ характеризует, как используется мощность источника. Поэтому $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности. Для передачи предприятию заданной мощности P , не-

обходимой для работы его механизмов (станки и т. п. – от двигателей), требуется ток при данном напряжении U электростанции

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Из уравнения видно, что чем меньше $\cos \varphi$, тем требуется больший ток для передачи требуемой мощности P . Увеличение тока I приводит к увеличению электрических потерь на нагрев обмоток генератора и подводящих проводов $\Delta P = rI^2 = \frac{rP^2}{U^2 \cos^2 \varphi}$. Это удорожает подводимую электроэнергию. Кроме того, может недопустимо увеличиться нагрев обмотки генератора.

Следовательно, задача повышения $\cos \varphi$ является очень важной государственной задачей!

Рассмотрим смысл и способы повышения $\cos \varphi$. Если бы все приемники имели только активные сопротивления, то сдвига по фазе между током и напряжением в сети не было бы и тогда $\varphi = 0$. Следовательно, $\cos \varphi = 1$. Но обычно общий ток в сети предприятия имеет индуктивный характер за счет индуктивностей обмоток работающих двигателей. Следовательно, общий ток в сети отстает от напряжения на угол φ и $\cos \varphi < 1$. В этом случае повысить $\cos \varphi$ можно путем подключения параллельно нагрузке, например, батарею специальных конденсаторов, имеющих емкостной ток.

На рис. 4.54 показано подключение к нагрузке $Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$ батареи конденсаторов, и при помощи векторной диаграммы показан результат этого подключения – $\cos \varphi_H$ нагрузки увеличился до $\cos \varphi$ после подключения батареи конденсаторов.

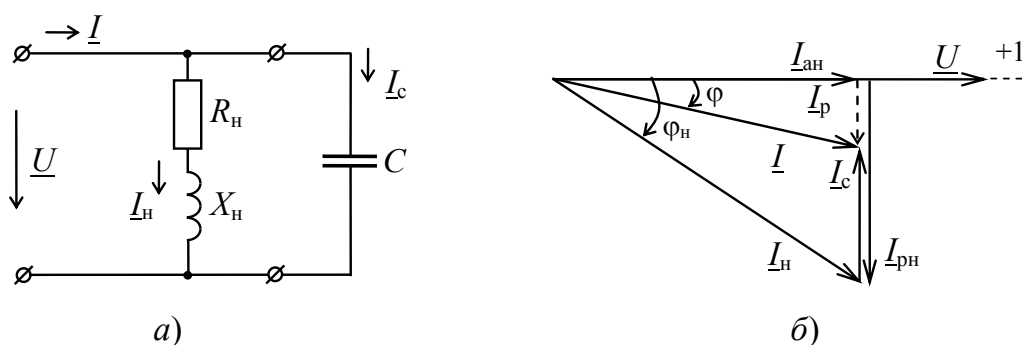


Рис. 4.54. Подключение к нагрузке $Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}$:

а – схема цепи; б – векторная диаграмма

Обычно при помощи батареи конденсаторов компенсацию угла сдвига фаз осуществляют не полностью, повышая $\cos \varphi$ до 0,9–0,95. При стремлении к дальнейшему повышению $\cos \varphi$ батареи конденсаторов оказываются экономически невыгодными.

Следует еще раз подчеркнуть, что повышение $\cos \varphi$ является важной народнохозяйственной задачей.

Вопросы

4.1. Представление синусоидальных ЭДС, напряжений, токов тригонометрическими функциями и графиками

1. Схема замещения (генератор-приемник $R-L$). Ток i промышленной частоты $f = 50$ Гц.

2. Тригонометрическая функция и временные диаграммы ЭДС $e = f(t)$ и $e = f(\omega t)$.

3. Амплитуда, фаза, частота, период, начальная фаза ЭДС, напряжения, тока.

4. Сдвиг по фазе между синусоидальными величинами.

4.2. Действующие значения синусоидальных токов, ЭДС и напряжений

1. Почему необходимо для расчетов цепей синусоидального тока ввести понятие действующего значения I , U , E ?

2. Что такое действующее значение I , и из каких соображений оно определяется?

3. Действующие значения E , U .

4.3. Представление синусоидальных токов и напряжений вращающимися векторами

1. Вращающийся вектор \underline{U}_m в декартовой системе координат против часовой стрелки со скоростью ω .

2. Проекция вращающегося \underline{U}_m на ось времени.

3. Введение понятия векторных диаграмм.

4. Суммирование и вычитание векторов.

4.4. Электрическая цепь с резистивным элементом

1. Схема замещения цепи с резистором R , к которому приложено $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$.

2. Как определить i , I_m , ψ_i , U , I , P ?

3. Построить временные диаграммы $u(\omega t)$, $i(\omega t)$, $p(\omega t)$.

4. Векторные диаграммы \underline{I} , \underline{U} в координатах x – y .

4.5. Электрическая цепь с идеальной индуктивностью

1. Чем отличается идеальная индуктивность от реальной катушки индуктивности?
2. Схема замещения цепи с идеальной индуктивностью L , по которой протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$.
3. Как определить e_L , E_{mL} , ψ_e , E_L , I , u , U_{mL} , ψ_u , U_L , x_L ?
4. Закон Ома для действующих значений.
5. Векторная диаграмма (\underline{U}_L и \underline{E}_L относительно вектора \underline{I}).
6. Мгновенное значение активной мощности в цепи.
7. Временные диаграммы i , e_L , u_L , P в функции ωt .
8. Анализ временной диаграммы $p = f(\omega t)$.
9. Реактивная индуктивная мощность Q_L .
10. А если к этой цепи подключить постоянное напряжение?

4.6. Электрическая цепь с идеальной емкостью

1. Какой вид энергии запасается в емкости конденсатора?
2. Схема замещения цепи с идеальной емкостью C , к которой подведено напряжение $u = u_c = U_{mc} \sin(\omega t + \psi_u)$.
3. Определить i , ψ_i , I_c , x_c , P_c .
4. Закон Ома для действующих значений.
5. Векторная диаграмма \underline{I}_c относительно \underline{U}_c .
6. Временные диаграммы u_c , i , P_c в функции ωt .
7. Анализ векторной и временных диаграмм.
8. Реактивная емкостная мощность Q_C .
9. А если к этой цепи подключить постоянное напряжение?

4.7. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками $R-L$

1. Схема замещения цепи $R-L$, по которой протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$.
2. Схема замещения цепи $R-L$ для действующих значений.
3. Уравнение по второму закону Кирхгофа в векторной форме.
4. Векторная диаграмма \underline{U} относительно \underline{I} .
5. Треугольник сопротивлений $R-X_L-Z$.
6. Упрощенная схема.
7. Расчет цепи $R-X_L$.
8. Цепь $R-L$ на постоянном токе.

4.8. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками R – C

1. Схема замещения цепи R – C , по которой протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$.
2. Схема замещения цепи R – C для действующих значений.
3. Уравнения по второму закону Кирхгофа в векторной форме.
4. Векторная диаграмма цепи \underline{U} относительно \underline{I} .
5. Треугольник сопротивлений R – X_C – Z .
6. Упрощенная схема.
7. Расчет цепи R – X_C .
8. Цепь R – C на постоянном токе.

4.9. Электрическая цепь с последовательно соединенными приемниками R – L – C

1. Схема замещения цепи R – X_L – X_C .
2. Упрощенная схема замещения цепи.
3. Расчет цепи.
4. Векторная диаграмма цепи R – X_L – X_C .
5. Мощности P , Q_L , Q_C , S .

4.10. Резонанс напряжений в цепи R – L – C

1. Что такое резонанс напряжений?
2. Условие возникновения резонанса.
3. При резонансе напряжений изменение величин Z , I , U_L , U_C , S источника.
4. Векторная диаграмма напряжений при резонансе.
5. Частотные характеристики цепи при резонансе.
6. Значение резонанса в электротехнике, электронике, в автоматике.

4.11. Электрическая цепь с параллельно соединенными приемниками

1. Примеры использования таких цепей.
2. Схема замещения с параллельно включенными R – X_L и R – X_C .
3. Упрощенная схема Z_1 и Z_2 , включенные параллельно.
4. Расчет токов I_1 , I_2 , φ_1 , φ_2 .
5. Расчет I_{a1} , I_{a2} , I_{p1} , I_{p2} из треугольников тока.
6. Расчет I_a и I_p , а также I и сдвиг по фазе φ .
7. Векторная диаграмма токов относительно \underline{U} .
8. Треугольник проводимостей.
9. Пример решения конкретной цепи.
10. Баланс мощностей.

4.12. Резонанс токов

1. Схема замещения с параллельно включенными приемниками.
2. Обмен энергией между магнитным полем индуктивности и электрическим полем емкости конденсатора.
3. Условие резонанса токов.
4. Векторная диаграмма токов схемы замещения.
5. Частотные характеристики $I_L = f(\omega)$, $I_C = f(\omega)$, $I = f(\omega)$.
6. Анализ векторной диаграммы и частотных характеристик:
 - 6.1. Сдвиги фаз.
 - 6.2. Равенство реактивных токов.
 - 6.3. Чему равен общий ток при резонансе?
 - 6.4. Условие резонанса.
 - 6.5. Резонанс токов безопасен?

4.13. Расчет сложных цепей с одним источником

1. Схема замещения сложной электрической цепи.
2. Расчет реактивных сопротивлений X_L , X_C .
3. Упрощение схемы (расчет Z_1 , Z_2 из треугольников сопротивлений).
4. Расчет сдвига по фазе φ_1 и φ_2 из треугольников сопротивлений ветви I и ветви II.
5. Расчет токов в ветвях I_1 и I_2 .
6. Векторная диаграмма токов относительно вектора \underline{U}_{ab} .
7. Из треугольников векторов токов расчет I_{1a} , I_{1p} , I_1 , I_{2a} , I_{2p} , I_2 .
8. Токи через источник I_{3a} , I_{3p} , I_3 .
9. Сопротивление источника R_3 .
10. Расчет мощностей P_1 , P_2 , P_3 , Q_{1p} , Q_{2p} , S_1 , S_2 .

4.14. Мощность в цепи синусоидального тока

1. Активная мощность цепи, имеющей n активных сопротивлений.
2. Реактивная мощность в цепи с m индуктивностей.
3. Реактивная мощность в цепи с l емкостей.
4. Полная мощность.
5. Треугольник мощностей.

4.15. Повышение коэффициента мощности в цепях синусоидального тока

1. $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.
2. Пути повышения коэффициента мощности.

ГЛАВА 5 ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

5.1. Система трехфазного переменного тока

Само название говорит о том, что эта система состоит из трех фаз, т. е. представляет собой совокупность трех однофазных цепей переменного синусоидального тока. Но, главное, эти три синусоидальные цепи сдвинуты относительно друг друга на угол $\frac{2\pi}{3} = 120^\circ$.

Следовательно, сумма трех углов оказывается равной $2\pi = 360^\circ$, что позволяет создавать *круговое магнитное поле*.

Это великое открытие, которое совершил русский инженер М. О. Доливо-Добровольский в 1891 г. Он же разработал трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель.

Система трехфазного переменного тока получила *широчайшее* распространение во всем мире как система, обеспечивающая более *экономичную передачу* энергии и позволяющая создавать *надежные в работе и простые по устройству генераторы, электродвигатели, трансформаторы и другие аппараты*.

Кроме этого, в трехфазной системе ЭДС можно получить одновременно два эксплуатационных напряжения – фазного и линейного.

Поэтому электрическую энергию вырабатывают на электростанциях, передают на расстояния к потребителю и используют чаще всего как энергию трехфазного тока.

Трехфазная система переменного тока состоит из трех основных частей:

1. Трехфазный генератор (на электростанции), в котором механическая энергия паровой турбины или гидротурбины преобразуется в электрическую энергию с трехфазной системой ЭДС.

2. Комплекс устройств для передачи электрической энергии от генератора на электростанции к потребителю: повышающие трансформаторы, высоковольтные линии передачи, понижающие трансформаторы, устройства управления, контроля, защиты и др.

3. Различные потребители (приемники), которые могут быть как трехфазными (например, электродвигатели), так и однофазными (например, бытовые устройства).

5.2. Простейший трехфазный генератор

Трехфазный генератор представляет собой синхронную машину двух типов: турбогенератор или гидрогенератор. Схематично его можно изобразить в виде простейшего генератора с одной парой полюсов на роторе.

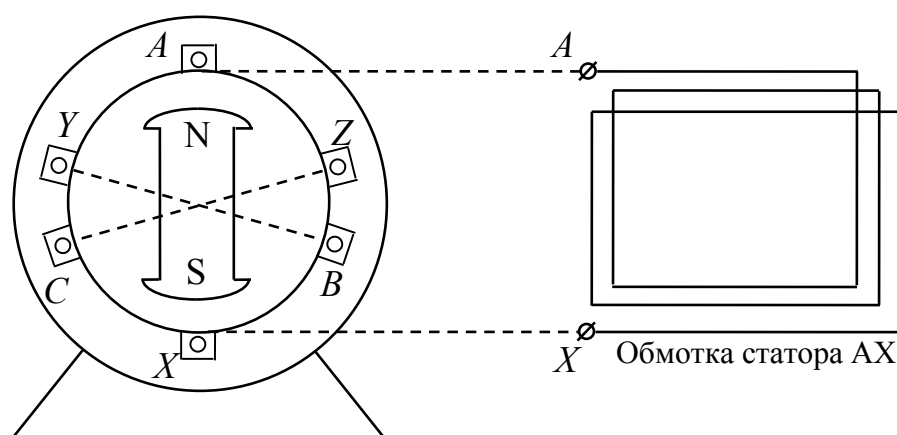


Рис. 5.1. Трехфазный генератор

На статоре генератора расположены три одинаковые, но смещенные в пространстве одна относительно другой на угол $\frac{2\pi}{3}$ (120°) обмотки AX , BY , CZ . Их называют фазными обмотками или, просто, фазами. Каждая обмотка представляет собой рамку, состоящую из n витков провода. Начало обмоток обозначают буквами A , B , C , концы – X , Y , Z .

При вращении ротора магнитное поле обмотки ротора (условно показано 2 полюса постоянного магнита) пересекает витки обмоток статора и наводит в них ЭДС (как и в однофазном генераторе). Обмотки на схемах замещения обозначают условно в виде индуктивностей. При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз индуцируются синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, одинаковой амплитуды, но смещенные на 120° (симметричная система). За условное положительное направление ЭДС в каждой фазе принимают направление от конца к началу, как указано на рис. 5.2.

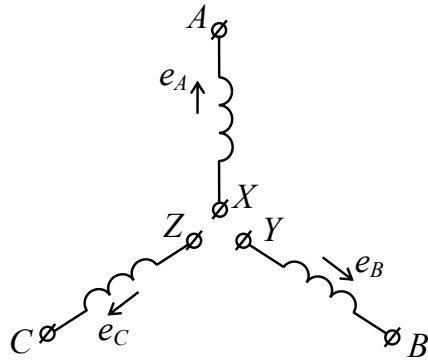


Рис. 5.2. Фазные обмотки

Каждая из фазных обмоток генератора является *самостоятельным источником* электрической энергии и может быть нагружена на свой приемник энергии.

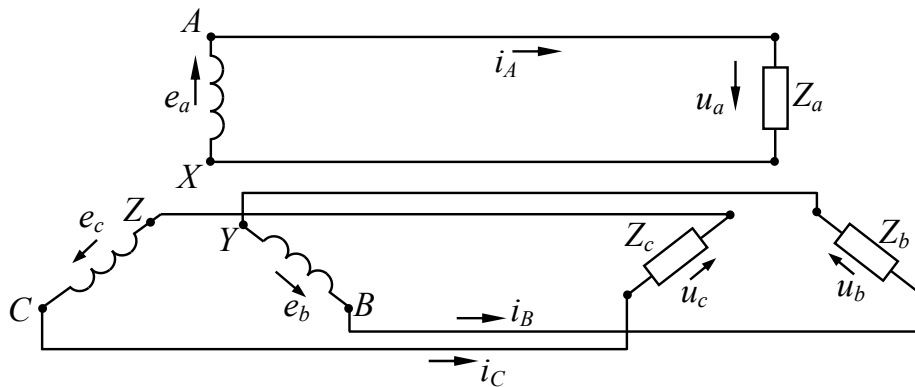


Рис. 5.3. Три однофазных цепи, ЭДС в которых
сдвинуты на угол $\frac{2\pi}{3}$

В этом случае получается несвязанная трехфазная система, требующая для передачи энергии шести проводов. Такая система неэкономична и *на практике не применяется*.

На практике применяются более совершенные экономичные связанные цепи, в которых фазные обмотки электрически соединены между собой по схеме звезды или треугольника.

5.3. Соединение обмоток трехфазного генератора звездой

При соединении обмоток трехфазного генератора звездой концы обмоток X, Y, Z соединяют в одну точку, называемую нулевой точкой или нейтралью генератора. Генератор соединяется с приемниками энер-

гии тремя (трехпроводная цепь) или четырьмя (четырёхпроводная цепь) проводами. Три из них, называемые линейными, присоединяются к началам обмоток A, B, C , а четвертый – нулевой, или нейтральный, провод присоединяется к нейтральной точке N (рис. 5.4). В трехпроводной цепи нейтральный провод отсутствует.

Напряжения между линейными проводами (началом обмоток) u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} называются линейными. Порядок индексов показывает положительное направление линейных напряжений во внешней цепи (AB – от $A \rightarrow B$, и т. д.)

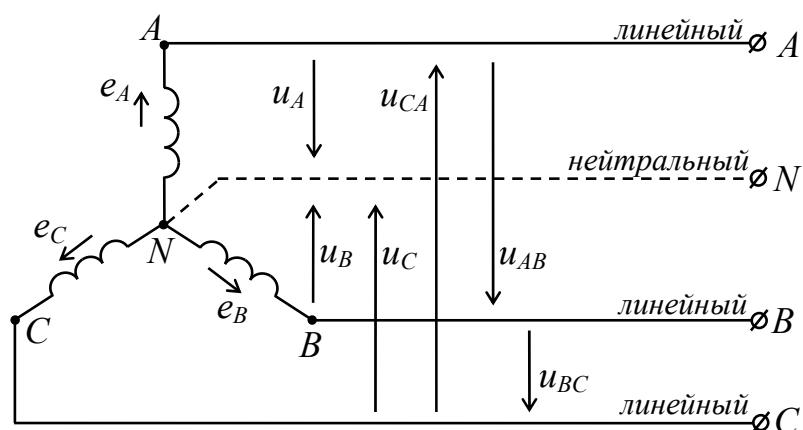


Рис. 5.4. Соединение обмоток звездой

Напряжения между линейными и нейтральным проводами (между началами и концами обмоток) u_A, u_B, u_C называются *фазными*.

Положительное направление фазных напряжений принято от начала к концу фазных обмоток (от линейного к нейтральному проводу). Для участков цепи между точками $A-B, B-C, C-A$ уравнения по второму закону Кирхгофа (для определения связи между $u_{\text{л}}$ и $u_{\text{ф}}$):

$$u_{AB} - u_A + u_B = 0;$$

$$u_{BC} - u_B + u_C = 0;$$

$$u_{CA} - u_C + u_A = 0.$$

Отсюда

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$

$$u_{BC} = u_B - u_C;$$

$$u_{CA} = u_C - u_A.$$

Векторы линейных напряжений связаны с векторами фазных напряжений соотношениями:

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

$$U_{\text{я}} = 2U_{\phi} \cos 30^{\circ} = 2U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_{\phi}, \quad (5.3)$$

Векторы линейных напряжений всегда образуют замкнутый треугольник, так как их сумма *тождественно* равна нулю, независимо от характера нагрузки.

106

– если $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, то $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$;

– если $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$, то $U_{\text{ф}} = 127 \text{ В}$.

Они связаны между собой соотношением $\sqrt{3} \approx 1,73$.

Четырехпроводная цепь позволяет использовать два напряжения питания – *фазное* и *линейное*, т. е. можно подключать однофазные приемники к фазным напряжениям $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ относительно нейтрального провода N .

Обмотки генератора можно соединять и в схему треугольника, в которой $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ (рис. 5.6).

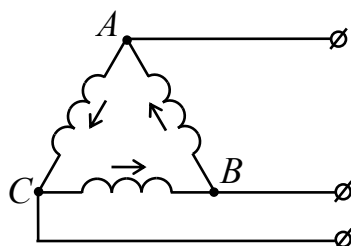


Рис. 5.6. Соединение обмоток треугольником

На практике фазы обмоток *трехфазных генераторов* предпочитают соединять звездой, а не треугольником. Это объясняется прежде всего тем, что в случае *отклонения* ЭДС источника от синусоидальной формы появляются высшие гармоники, вследствие чего сумма мгновенных значений ЭДС не будет равна нулю. Поэтому в обмотке генератора, соединенной треугольником, и при отсутствии нагрузки возникнут токи, которые вызовут ее нагревание и снижение КПД генератора.

5.4. Способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС

Также как и в однофазной системе синусоидальных ЭДС, трехфазная система ЭДС может быть изображена тригонометрическими функциями, графиками, векторами, функциями комплексного переменного.

Примем фазу A (обмотка $A-X$) за исходную, а начальный фазовый угол ее ЭДС $\psi_{e_A} = 0$.

Тогда

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad (5.4)$$

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad (5.5)$$

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - 2\frac{2\pi}{3}\right) = E_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right). \quad (5.6)$$

В соответствии с формулами (5.4)–(5.6) графики мгновенных значений фазных ЭДС будут, как на рис. 5.7.

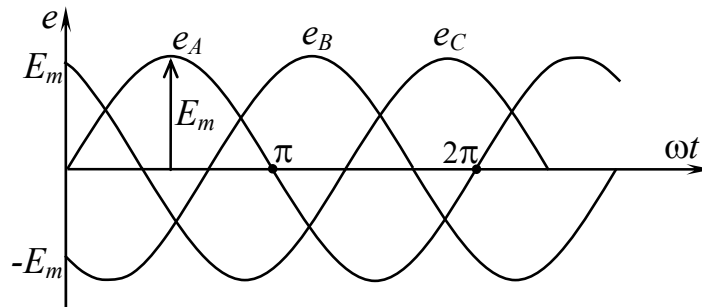


Рис. 5.7. Временные диаграммы ЭДС

Векторная диаграмма трехфазных ЭДС будет, как на рис. 5.8. Из векторной диаграммы видно, что $\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$ – для симметричной системы.

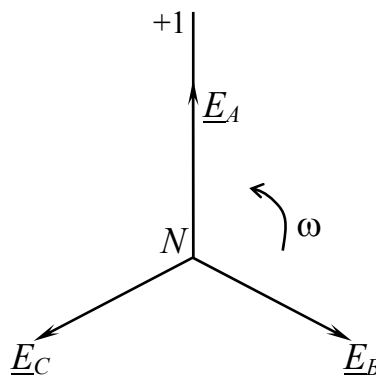


Рис. 5.8. Векторная диаграмма ЭДС (прямая последовательность фаз)

Систему ЭДС, в которой \underline{E}_B отстает по фазе от \underline{E}_A , а \underline{E}_C отстает по фазе от \underline{E}_B (система ABC), называют прямой последовательностью фаз. Если изменить направление вращения ротора генератора, то поменяется последовательность фаз (система ACB). В этом случае последовательность фаз будет обратной. Мы будем рассматривать только *прямую последовательность фаз*.

5.5. Передача электрической энергии потребителю

Для электростанций, на которых работают трехфазные генераторы, устанавливают следующую шкалу напряжений по ГОСТу:

3,15 кВ; 6,3 кВ; 10,5 кВ; 20 кВ; 21 кВ.

Стандартная частота трехфазного тока 50 Гц.

Потребителям электроэнергии, которые расположены вблизи электростанции, передают обычно по кабельным линиям на генераторном напряжении 6,3 кВ и 10,5 кВ.

Для передачи электроэнергии удаленным от станции потребителям применяют более высокие напряжения: 35, 110, 150, 220, 330, 500 и 750 кВ.

Рядом с электростанцией сооружается повышающая трансформаторная подстанция, от которой отходят линии электропередачи, связывающие электростанцию с системой потребления.

В районе потребления сооружаются понижающие подстанции, через которые электроэнергия распределяется между отдельными потребителями.

Основными агрегатами подстанций являются повышающие (на электростанции) или понижающие (у потребителя) трансформаторы, имеющие мощности того же порядка, что и генераторы.

Для распределения электроэнергии по потребителям используется распределительное устройство, содержащее аппараты управления, контроля и защиты.

Необходимость в высоком напряжении при передаче электроэнергии к удаленным потребителям объясняется возможностью уменьшить потери энергии в проводах линий электропередач. Действительно, мощность потерь $P_{\text{п}} = I^2 r_{\text{л}}$, где $r_{\text{л}}$ – сопротивление провода линии. Уменьшая ток I , мы уменьшаем потери. Но если при этом мы во столько же раз увеличиваем напряжение, то полезная передаваемая мощность практически не изменится.

Вторичные обмотки понижающего трансформатора в понижающей подстанции, питающей потребителей, соединяются в схему звезды, четыре вывода которой подсоединяются к четырехпроводной промышленной или городской электрической сети, как показано на рис. 5.9.

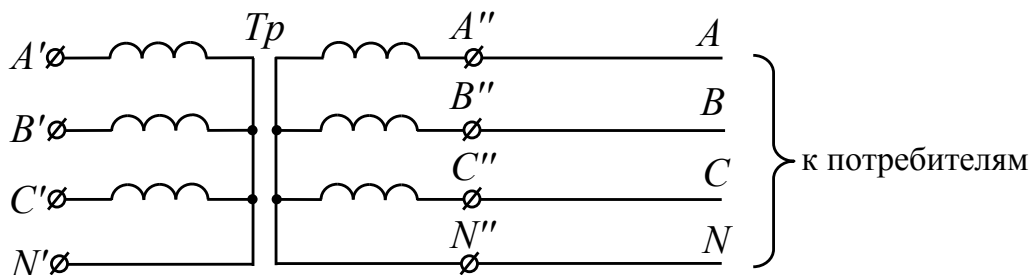


Рис. 5.9. Трехфазная электрическая цепь

Напряжения U'_{ϕ} и $U'_{\text{л}}$ – высоковольтные, линий электропередачи от генератора. Напряжения U''_{ϕ} и $U''_{\text{л}}$ – на выходе понижающего трансформатора Tr .

Напряжения U_A, U_B, U_C – фазные в четырехпроводной электрической сети (стандартные значения 220 В, 127 В).

Напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные в этой сети.

5.6. Классификация приемников и способы их включения в трехфазную цепь

Приемники, включаемые в трехфазную цепь, могут быть как однофазными (лампы накаливания, однофазные двигатели и др.), так и трехфазными (двигатели и т. п.).

Трехфазные приемники бывают симметричными и несимметричными. Симметричными называются приемники, у которых сопротивление фаз приемников $Z_a = Z_b = Z_c$. Если же это условие не выполняется, то приемники несимметричные. При этом нагрузка может быть равномерной, если $Z_a = Z_b = Z_c$, или однородной, если $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$.

Фазы приемников могут соединяться как звездой, так и треугольником. При этом способ соединения фаз генератора не определяет способа соединения фаз приемника.

Примеры включения однофазных и трехфазных симметричных и несимметричных приемников приведены на рис. 5.10.

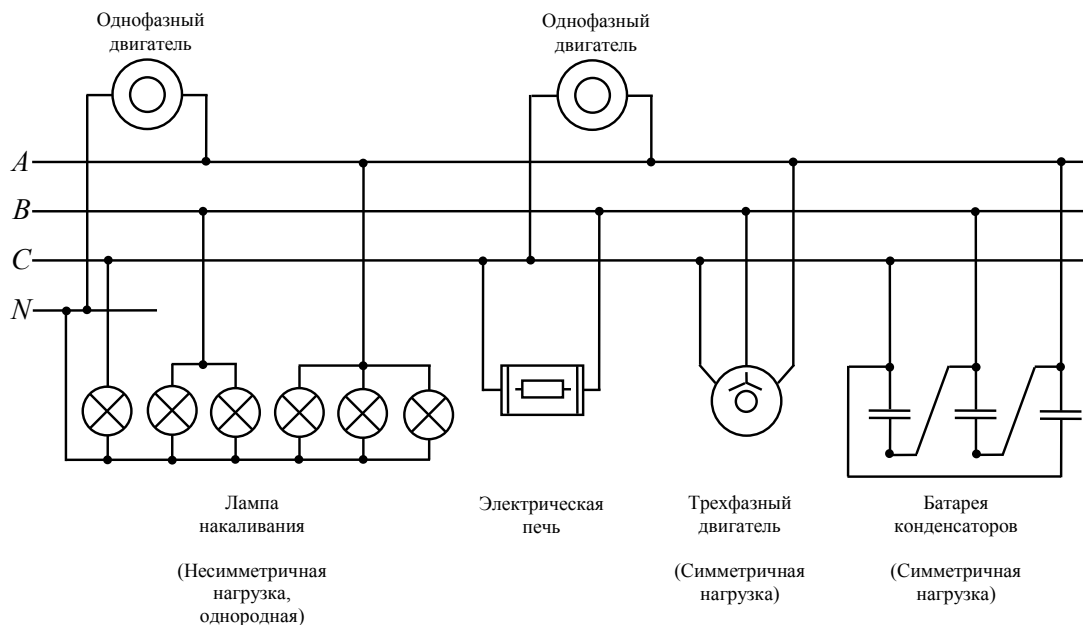


Рис. 5.10. Примеры включения приемников в трехфазную электрическую цепь

5.7. Соединение приемников звездой

Приемники энергии, как трехфазные, так и три однофазных приемника, могут соединяться звездой. При этом трехфазная система может быть четырехпроводной, если приемник получается несимметричным, или трехпроводной, если приемник симметричный.

Рассмотрим сначала четырехпроводную систему трехфазной цепи с несимметричным приемником, схема которого приведена на рис. 5.11, где E_A, E_B, E_C – ЭДС вторичной обмотки трансформатора на рис. 5.9.

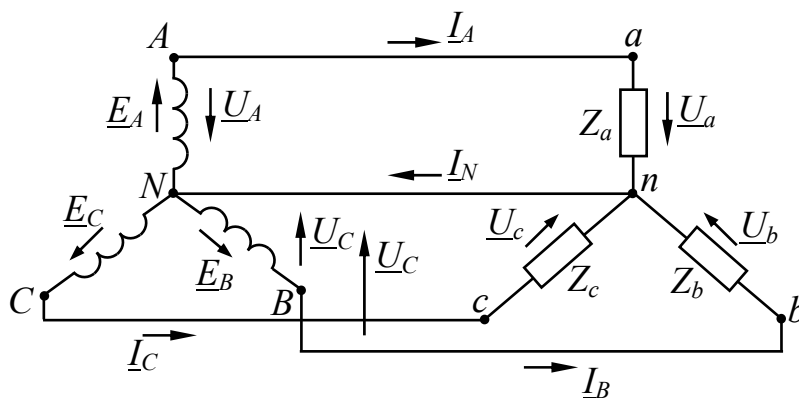


Рис. 5.11. Схема соединения «звезда – звезда с нейтралью»

У несимметричного приемника $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$. Но так как имеется нейтральный провод, то все три фазы приемника работают автономно. Действительно, $\underline{U}_a = \underline{U}_A$, $\underline{U}_b = \underline{U}_B$, $\underline{U}_c = \underline{U}_C$, т. е. все фазные напряжения приемников будут симметричными и равными фазным напряжениям источника питания как по величине, так и по фазе.

Но токи в фазах будут разными, согласно закону Ома: $\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{Z_a}$,
 $\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{Z_b}$, $\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{Z_c}$.

Таким образом, нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Поэтому в четырехпроводную сеть включают однофазные приемники, например, квартиры в городах, лампы накаливания и т. д.

Режим работы каждого такого приемника не будет зависеть от режима работы других приемников. При этом ток в нейтральном проводе будет определяться по первому закону Кирхгофа $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$.

По сути дела, трехфазная электрическая цепь, соединенная звездой, при наличии нейтрального провода работает как три однофазные независимые друг от друга цепи. Анализ и расчет таких однофазных цепей мы рассмотрели в предыдущей главе.

Векторная диаграмма такой несимметричной цепи приведена на рис. 5.12.

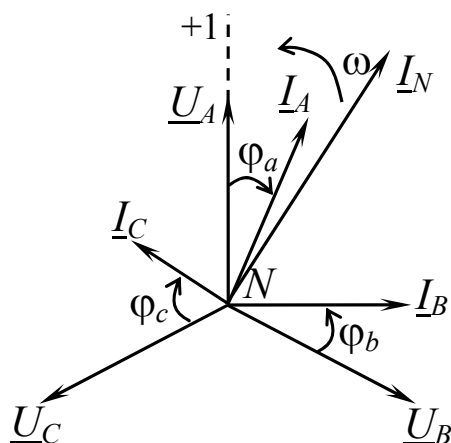


Рис. 5.12. Векторная диаграмма несимметричной цепи

Так как приемники несимметричные $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$, то и токи $I_A \neq I_B \neq I_C$, а также не равны углы сдвига по фазе $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$. Как

видим из векторной диаграммы, фазы A и C имеют индуктивный характер (токи отстают от своих напряжений), а фаза B имеет емкостной характер – ток I_B опережает напряжение U_B .

В том случае, когда сопротивления фаз трехфазного приемника равны, т. е. $Z_a = Z_b = Z_c$, то такие приемники называются симметричными. Следовательно, если включить его в четырехпроводную цепь, как показано на рис. 5.11, то, как и ранее, $\underline{U}_a = \underline{U}_A$, $\underline{U}_b = \underline{U}_B$, $\underline{U}_c = \underline{U}_C$. Но теперь токи $\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{Z_a}$, $\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{Z_b}$, $\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{Z_c}$ равны и по величине $\underline{I}_A = \underline{I}_B = \underline{I}_C$, и по углу сдвига фаз, т. е. $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$.

Следовательно, и векторная диаграмма токов и напряжений будет симметричной, как показано на рис. 5.13.

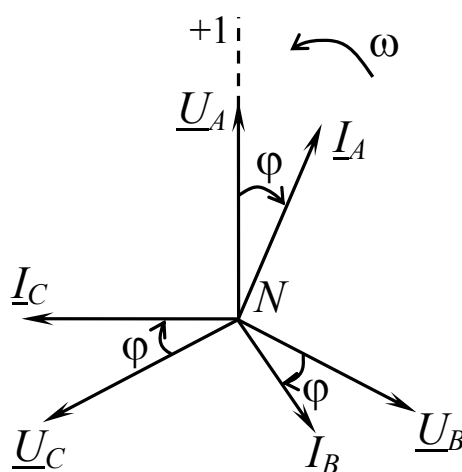


Рис. 5.13. Векторная диаграмма симметричной цепи

Для векторной диаграммы на рис. 5.13 запишем сумму векторов токов, отражающую сумму токов на схеме рис. 5.11 для симметричного приемника, $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N = 0$. На основе равенства $\underline{I}_N = 0$ в нейтральном проводе можно сделать вывод: при симметричной трехфазной нагрузке (приемнике) необходимость в нейтральном проводе отпадает.

В этом случае используется трехпроводная трехфазная цепь, показанная на рис. 5.14.

Как видим из схемы на рис. 5.14, линейные токи равны соответствующим фазным токам, т. е. $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

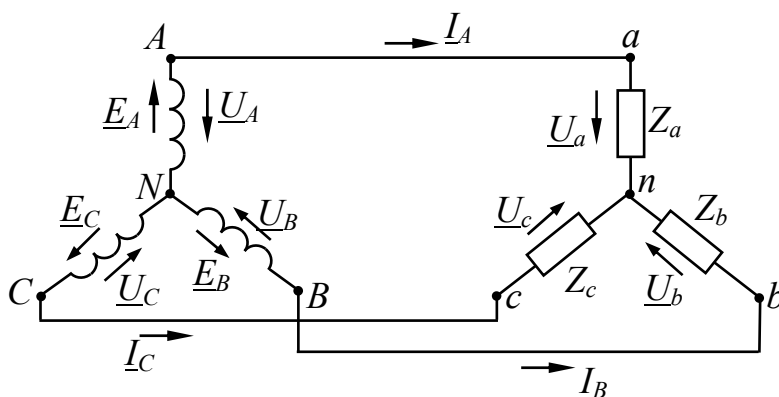


Рис. 5.14. Схема трехпроводной трехфазной симметричной цепи

Построим векторную диаграмму для напряжений и токов, указанных на схеме рис. 5.14 (рис. 5.15).

Решив треугольник $a-b-n$ на рис. 5.15, мы найдем, что при углах a , b и c , равных 30° , и угле n , равном 120° , напряжение

$$U_\phi = \frac{U_\text{л}}{\sqrt{3}}, \text{ или } U_\text{л} = \sqrt{3} \cdot U_\phi,$$

где $U_\text{л} = U_{ab}$, или $U_\text{л} = U_{bc}$, или $U_\text{л} = U_{ca}$.

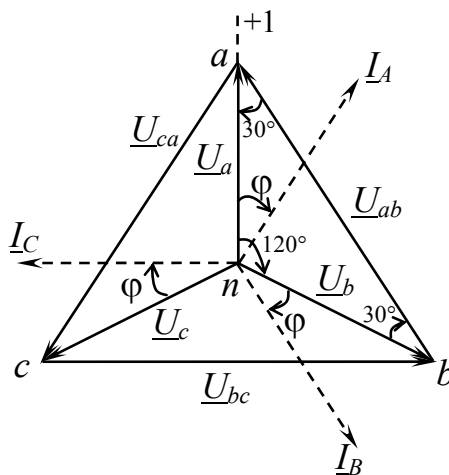


Рис. 5.15. Векторная диаграмма напряжений и токов схемы рис. 5.14

Схему «звезда» применяют для соединения приемников в тех случаях, когда их номинальное напряжение $U_\text{н}$ меньше линейного напряжения $U_\text{л}$ электрической сети (источника питания) в $\sqrt{3}$ раз, т. е. $U_\text{н} = \frac{U_\text{л}}{\sqrt{3}}$. Например, если приемник имеет номинальное напря-

жение $U_H = 220$ В, то его надо подключать звездой к сети с $U_L = 380$ В. Если же $U_H = 127$ В, то подключать звездой к сети с $U_L = 220$ В.

5.8. Соединение несимметричных приемников треугольником

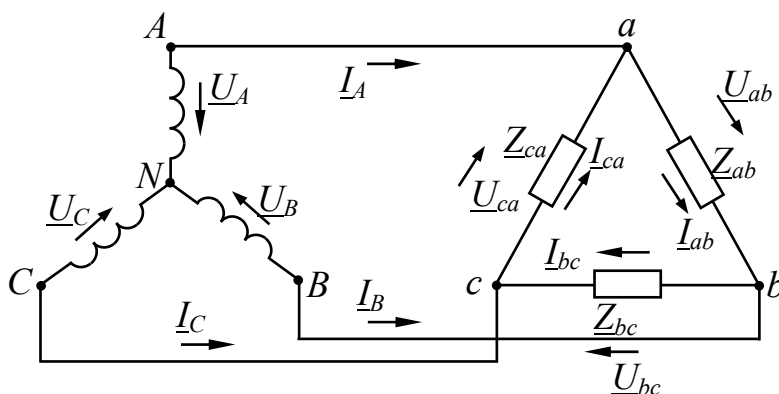


Рис. 5.16. Схема соединения несимметричных приемников треугольником

Из схемы (рис. 5.16) видно, что $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA}$, т. е. напряжения на приемниках равны соответствующим линейным напряжениям источника. Поэтому, по закону Ома, мы можем написать:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{\underline{U}_{AB}}{Z_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{\underline{U}_{BC}}{Z_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{\underline{U}_{CA}}{Z_{ca}},$$

где $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B$, $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$, $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$, а $Z_{ab} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ и $\varphi_{ab} \neq \varphi_{bc} \neq \varphi_{ca}$.

Следовательно, токи в приемниках не образуют симметричную векторную диаграмму. А это значит, что и линейные токи не образуют симметричную векторную диаграмму. Действительно, по первому закону Кирхгофа определим $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$, $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$, $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$.

Однако, несмотря на несимметричную нагрузку, выполняется первый закон Кирхгофа $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Построим векторную диаграмму напряжений и токов для схемы соединения приемников треугольником.

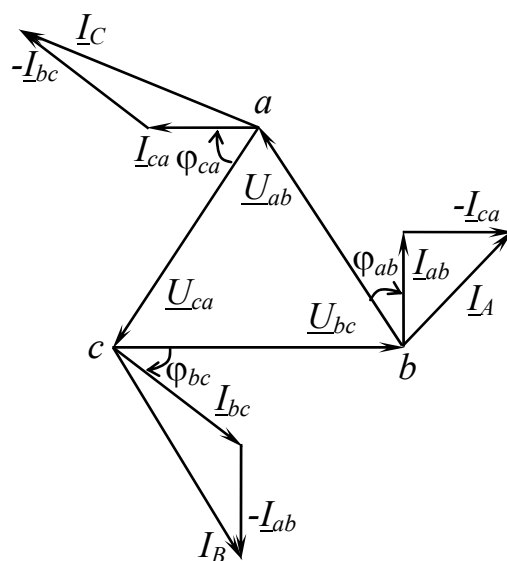


Рис. 5.17. Векторная диаграмма напряжений и токов для схемы рис. 5.16

Важная особенность соединения приемников треугольником – при изменении сопротивления приемника одной из фаз, режим работы других приемников не меняется, так как линейные напряжения источника не изменяются. Поэтому соединение приемников треугольником часто используется и на производстве, и в коммунальных хозяйствах, т.к. включенные на линейные напряжения в разных фазах однофазные приемники для электрической сети будут представлять трехфазный несимметричный приемник, включенный в сеть треугольником. Но и симметричный трехфазный приемник также можно включать треугольником, естественно, при соблюдении величины фазных напряжений приемника линейному напряжению сети, т. е. $U_{\text{ф.п}} = U_{\text{л.с}}$.

5.9. Мощность трехфазной цепи

В общем случае активная мощность трехфазной цепи равна *арифметической сумме* активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_a + P_b + P_c = U_{a\phi} \cdot I_{a\phi} \cos \varphi_a + U_{b\phi} \cdot I_{b\phi} \cos \varphi_b + U_{c\phi} \cdot I_{c\phi} \cos \varphi_c. \quad (5.7)$$

Реактивная мощность равна *алгебраической сумме* реактивных мощностей фаз:

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = U_{a\phi} \cdot I_{a\phi} \sin \varphi_a + U_{b\phi} \cdot I_{b\phi} \sin \varphi_b + U_{c\phi} \cdot I_{c\phi} \sin \varphi_c. \quad (5.8)$$

Здесь реактивная мощность индуктивностей берется со знаком «+», а емкостей – со знаком «-».

Полная (кажущаяся) мощность равна геометрической сумме общих активных и реактивных мощностей:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.9)$$

При симметричной нагрузке, когда $U_{a\phi} = U_{b\phi} = U_{c\phi} = U_{\phi}$, $I_{a\phi} = I_{b\phi} = I_{c\phi} = I_{\phi}$, $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$, то $P = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi$, а $Q = 3U_{\phi}I_{\phi}\sin\varphi$.

Если цепь соединена звездой, то $I_{\phi} = I_{\text{л}}$, $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$.

Следовательно, $P_{\text{л}} = 3 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} \cos\varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi$, $Q_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi$.

Если цепь соединена треугольником, то $U_{\phi} = U_{\text{л}}$, $I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$.

Следовательно, $P_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi$, $Q_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi$.

Как видим, при симметричной нагрузке P и Q можно определить по одним и тем же формулам, независимо от способа соединения приемников.

$$\begin{cases} P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos\varphi; \\ Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin\varphi; \\ S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}, \end{cases} \quad (5.10)$$

где $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение; $I_{\text{л}}$ – линейный ток.

5.10. Расчет трехфазных цепей с симметричными приемниками

При расчете трехфазных цепей обычно известно линейное напряжение $U_{\text{л}}$ и фазное сопротивление Z_{ϕ} .

Необходимо определить ток фазы I_{ϕ} , линейный ток $I_{\text{л}}$, фазное напряжение U_{ϕ} , мощности активную P , реактивную Q и полную S , а также необходимо построить векторную диаграмму.

Пусть нам необходимо рассчитать симметричные цепи, в которых приемники соединены звездой (рис. 5.18) и треугольником (рис. 5.19), где $Z_a = Z_b = Z_c = \sqrt{X^2 + R^2}$.

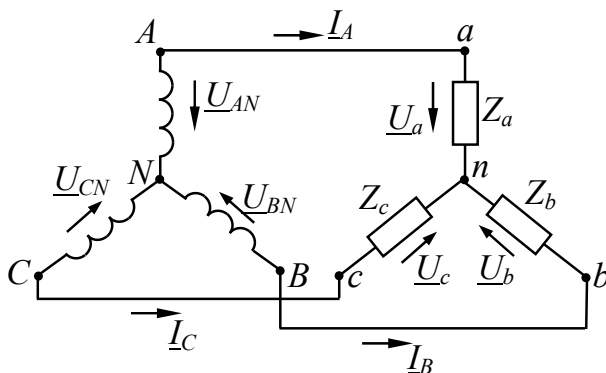


Рис. 5.18. Соединение приемников звездой

Используя предыдущие рассуждения, определяем:

1. $\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arccos \frac{R}{Z}$.
2. Фазное напряжение $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$.
3. Фазный ток приемника $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3} Z_{\phi}}$.
4. Линейный ток $I_{\text{л}} = I_{\phi}$.
5. Активная мощность $P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$.
6. Реактивная мощность $Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi$.
7. Полная мощность $S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

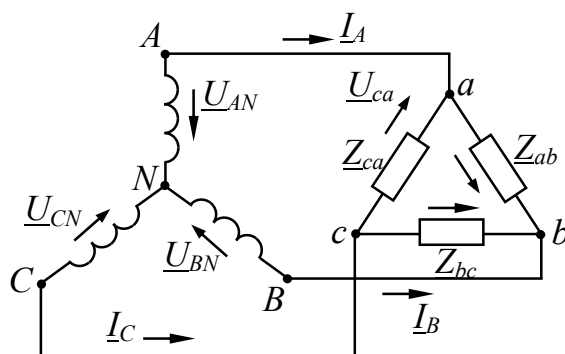


Рис. 5.19. Соединение приемников треугольником

1. $\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arccos \frac{R}{Z}$.
2. Фазное напряжение $U_{\phi} = U_{\text{л}}$.
3. Фазный ток $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\phi}}$.
4. Линейный ток $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}$.
5. Активная мощность $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi$.
6. Реактивная мощность $Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\sin\varphi$.
7. Полная мощность $S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Как видим из вышеприведенных формул, при симметричных приемниках расчет трехфазной цепи сводится, по сути дела, к расчету одной фазы. Построение векторных диаграмм приведено на рис. 5.20 и 5.21.

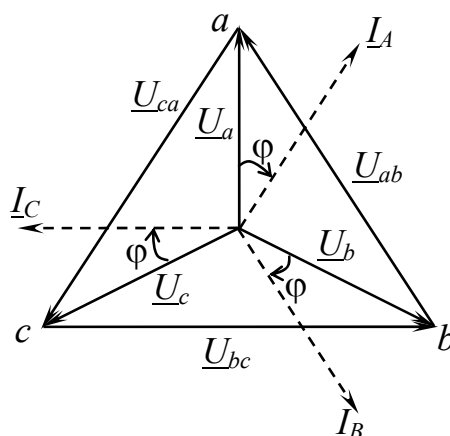


Рис. 5.20. Векторная диаграмма для схемы рис. 5.18

Пусть $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$, $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{10^2 + 8^2} = 12,7 \text{ Ом}$.

1. $\varphi = \arccos \frac{R}{Z} = \arccos 0,78 = 38^\circ$.
2. $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ А}$.
3. $I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{127}{12,7} = 10 \text{ А}$.
4. $I_{\text{л}} = I_{\phi} = 10 \text{ А}$.
5. $P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 0,78 = 2860 \text{ Вт}$.

$$6. Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 10 \cdot 0,62 = 2360 \text{ вар.}$$

$$7. S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2860^2 + 2360^2} = \sqrt{8200 + 5580} = 3700 \text{ ВА.}$$

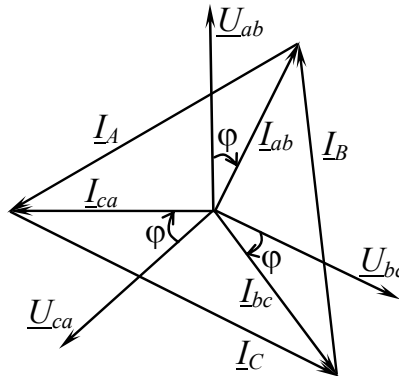


Рис. 5.21. Векторная диаграмма для схемы рис. 5.19

Те же самые приемники включены по схеме треугольника.

$$1. \varphi = \arccos \frac{R}{Z} = \arccos 0,78 = 38^\circ.$$

$$2. U_{\phi} = U_{\text{л}} = 220 \text{ В.}$$

$$3. I_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{Z_{\phi}} = \frac{220}{12,7} = 17,3 \text{ А.}$$

$$4. I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi} = 1,73 \cdot 17,3 = 30 \text{ А.}$$

$$5. P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 30 \cdot 0,78 = 8900 \text{ Вт.}$$

$$6. Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 30 \cdot 0,62 = 706 \text{ вар.}$$

$$7. S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{8900^2 + 7060^2} = 11600 \text{ ВА.}$$

5.11. Расчет трехфазных цепей с несимметричными приемниками

Если фазное напряжение несимметричного трехфазного приемника равно *фазному* напряжению электрической сети, т. е. $U_{\text{ф.п}} = U_{\text{ф.с}}$ (рис. 5.11), то каждая фаза трехфазного несимметричного приемника рассчитывается как однофазный приемник, подключенный к фазному напряжению сети – между линейным проводом и нейтральным проводом.

Если же фазное напряжение несимметричного трехфазного приемника равно *линейному* напряжению электрической сети, т. е. $U_{\text{ф.п}} = U_{\text{л.с}}$ (см. рис. 5.16), то каждая фаза трехфазного несиммет-

ричного приемника рассчитывается как однофазный приемник, подключенный к линейному напряжению сети – между линейными проводами.

Расчет однофазных электрических цепей приведен в четвертой главе данного пособия.

Вопросы

5.1. Система трехфазного переменного тока

1. История создания трехфазной системы.
2. Что такое система трехфазного тока и в чем главная идея ее разработки?
3. Достоинства такой системы.
4. Из каких основных частей состоит трехфазная система?
5. Назначение каждой части.

5.2. Простейший трехфазный генератор

1. Схема конструкции трехфазного генератора.
2. Расположение фазных обмоток относительно друг друга.
3. Принцип действия трехфазного генератора.
4. Сдвиг по фазе между ЭДС фазных обмоток.

5.3. Соединение обмоток трехфазного генератора звездой

1. Схема соединения обмоток звездой.
2. Линейные провода A , B , C и нейтральный провод.
3. Линейные и фазные напряжения. Их положительные направления.
4. Связь между линейными и фазными напряжениями и их векторами.
5. Векторная топографическая диаграмма напряжений.

5.4. Способы изображения трехфазной симметричной системы ЭДС

1. Тригонометрические функции e_A , e_B , e_C .
2. Временные диаграммы.
3. Векторные диаграммы.

5.5. Передача электрической энергии потребителю

1. Почему на электростанции устанавливают повышающие трансформаторы, а в районе потребления энергии – понижающие трансформаторы?
2. Какие еще устройства используют для передачи и распределения электроэнергии по потребителям?

5.6. Классификация приемников и способы их включения в трехфазную цепь

1. Классификация.
2. Примеры включения приемников в сеть.

5.7. Соединение приемников звездой (схема)

1. С нейтральным проводом. Расчет токов.
2. Векторная диаграмма напряжений и токов несимметричной цепи.
3. Векторная диаграмма напряжений и токов симметричной цепи.
4. Когда отпадает необходимость в нейтральном проводе?

5.8. Соединение несимметричных приемников треугольником

1. Схема.
2. Расчет токов.
3. Векторная диаграмма токов и напряжений.
4. Достоинство соединения приемников треугольником.

5.9. Мощность трехфазной цепи

1. Активная мощность при симметричной и несимметричной нагрузке.
2. Реактивная мощность при симметричной и несимметричной нагрузке.
3. Полная мощность при симметричной и несимметричной нагрузке.

5.10. Расчет трехфазных цепей с симметричными приемниками

1. Расчет цепи «звезда–звезда» (φ , U_{ϕ} , I_{ϕ} , $I_{\text{л}}$, P , Q , S).
2. Расчет цепи «звезда–треугольник» (φ , U_{ϕ} , $U_{\text{л}}$, I_{ϕ} , $I_{\text{л}}$, P , Q , S).
3. Векторные диаграммы для п. 1 и 2.

5.11. Расчет трехфазных цепей с несимметричными приемниками

1. При равенстве фазного напряжения приемника $U_{\text{п}}$ фазному напряжению сети $U_{\text{с}}$, т. е. $U_{\text{ф.п}} = U_{\text{ф.с}}$.
2. При равенстве фазного напряжения приемника $U_{\text{п}}$ линейному напряжению сети $U_{\text{с}}$, т. е. $U_{\text{ф.п}} = U_{\text{л.с}}$.

ГЛАВА 6

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

6.1. Возникновение переходных процессов и законы коммутации

До сих пор мы рассматривали (рассчитывали, анализировали) установившиеся (стационарные) процессы в линейных электрических цепях, в которых установленные режимы работы после подключения их к источникам энергии не изменялись.

Но если по каким-либо причинам *будет изменяться состояние электрической цепи*, появится переходный процесс в цепи, существенно отличающийся от стационарного. Под переходным процессом будем понимать процесс перехода *от одного установившегося режима работы электрической цепи к другому установившемуся режиму*, чем-либо отличающемуся от предыдущего.

Переходные процессы возникают в результате коммутации в цепи.

Коммутация – это процесс замыкания или размыкания различных переключателей, рубильников, выключателей, контактов реле и др., в результате чего *изменяются параметры цепи, напряжения на элементах цепи, токи в цепи* или в ее элементах.

Если рассматривать с точки зрения физики, то переходные процессы представляют собой процессы перехода от одного *энергетического состояния цепи*, которое было до коммутации, к другому *энергетическому состоянию цепи*, которое возникло после коммутации. А так как *количество энергии не может измениться мгновенно*, т. е. скачкообразно, то переходные процессы в электрических цепях происходят не скачком, а *протекают во времени*, пусть и быстро, но во времени.

Однако изучение переходных процессов и их закономерностей, а также их расчет, *необходимы*, так как возможны превышения допустимых напряжений и токов на отдельных участках электрической цепи в переходном режиме, что может привести к аварийной ситуации.

Первый закон коммутации

Ток через индуктивность L непосредственно до коммутации $i_L(0-)$ равен току через ту же индуктивность непосредственно (сразу же) после коммутации $i_L(0+)$, т. е.

$$i_L(0-) = i_L(0+), \quad (6.1)$$

где $(0-)$ – время перед коммутацией; $(0+)$ – время после коммутации.

Первый закон коммутации указывает на то, что ток в *индуктивности* i_L *не может скачком* изменяться в момент коммутации.

Самое простое и очевидное доказательство справедливости этого закона заключается в том, что энергию магнитного поля в индуктивности создает электрический ток i_L в индуктивности. А энергия скачком изменяться не может! Следовательно, и ток i *скачком изменяться* не может, так как энергия в магнитном поле индуктивности равна $W_L = L \frac{i_L^2}{2}$. А напряжение u_L *может изменяться скачком*.

Второй закон коммутации

Напряжение на емкости C непосредственно до коммутации $u_C(0-)$ равно напряжению на емкости C непосредственно после коммутации, т. е.

$$u_C(0-) = u_C(0+). \quad (6.2)$$

Второй закон коммутации указывает на то, что *напряжение* u_C на емкости C *не может скачком* изменяться в момент коммутации, потому что *энергию* электрического поля в емкости создает напряжение u_C на обкладках конденсатора (емкости). А энергия скачком изменяться не может! Следовательно, и напряжение u_C скачком изменяться не может, так как энергия электрического поля конденсатора равна $W_C = C \frac{u_C^2}{2}$. А ток i_C может изменяться скачком.

Расчет напряжений и токов на участках исследуемой электрической цепи во время переходного процесса осуществляют, пользуясь дифференциальными уравнениями, составленными по законам Кирхгофа для *мгновенных значений* токов и напряжений. Для линейных электрических цепей с постоянными R , L и C эти уравнения с постоянными коэффициентами.

Для конкретного представления о переходных процессах рассмотрим некоторые коммутации в простейших электрических цепях $R-L$ и $R-C$, а также анализ переходных процессов, вызванных этими коммутациями.

6.2. Короткое замыкание в цепи $R-L$

На рис. 6.1 показан участок цепи постоянного тока, на котором произошло короткое замыкание.

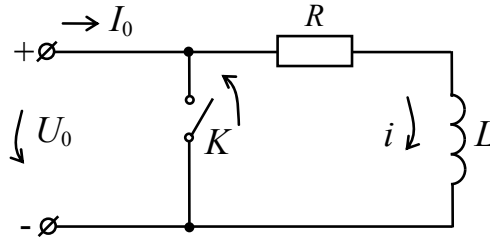


Рис. 6.1. Короткое замыкание в цепи $R-L$

Составим дифференциальное уравнение (ДУ) по второму закону Кирхгофа до замыкания ключа ($t < 0$) в общем случае

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_0. \quad (6.3)$$

В момент $t = 0$ замкнем ключ K . В этот момент ($t = 0$) $U_0 = 0$, но по замкнутому контуру $R-L$ через ключ K . Под воздействием энергии магнитного поля индуктивности протекает ток i . Так как в цепи $R-L$ ток не может изменяться скачком, то при $t = 0$ ток $i = I_0$. При $U = 0$ уравнение (6.3) оказывается без правой части

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0. \quad (6.4)$$

После интегрирования ток в замкнутом контуре $R-L$ (при замкнутом ключе K) будет

$$i = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{R}{L} \tau} = I_0 e^{-\frac{R}{L} \tau}, \quad (6.5)$$

где $e = 2,7183$, т. е. i изменяется по экспоненциальному закону, где $\frac{R}{L}$ – коэффициент затухания (уменьшения) тока, а обратная величина

этого коэффициента называется постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$.

Тогда

$$i = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.6)$$

На рис. 6.2 показаны графики изменения ЭДС e_L и тока i в зависимости от времени.

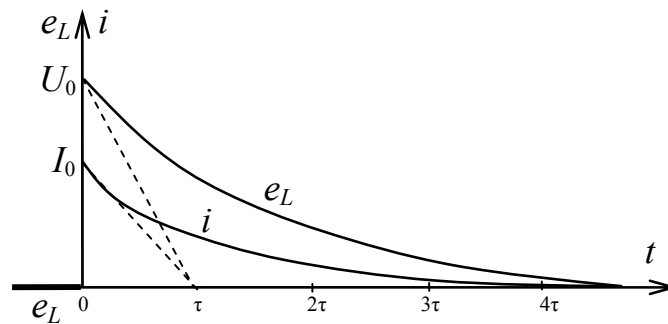


Рис. 6.2. Экспоненциальное изменение e_L и i

Постоянная времени $\tau = \frac{L}{R}$ равна подкасательной на временной оси в любой точке экспоненты.

В короткозамкнутой цепи постоянного тока с индуктивностью L появляется ЭДС e_L самоиндукции, которая и поддерживает ток i в замкнутом контуре $L-R$ за счет накопленной энергии в магнитном поле:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

При $t=0$ $e_L = U_0$.

Эта энергия $W_L = \frac{LI_0^2}{2}$, запасенная в магнитном поле индуктивности еще до замыкания ключа K , расходуется на нагрев сопротивления R цепи.

6.3. Короткое замыкание в цепи $R-C$

Аналогичные процессы протекают и при коротком замыкании в цепи $R-C$. Только здесь энергия запасается не в магнитном поле, как в цепи $R-L$, а в электрическом поле, которое создается не током, а напряжением u_C . И так же, как и в цепи $R-L$, здесь вся запасенная энергия в электрическом поле конденсатора до короткого замыкания

$W_C = \frac{CU_0^2}{2}$, расходуется на нагрев сопротивления R .

На рис. 6.3 показана схема замещения участка электрической цепи $R-C$, где «произошло» короткое замыкание.

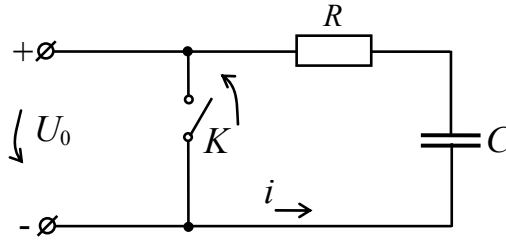


Рис. 6.3. Короткое замыкание в цепи R – C

Составим дифференциальное уравнение (ДУ) по второму закону Кирхгофа до замыкания ключа K ($t < 0$) в общем случае для участка цепи R – C :

$$Ri + u_C = U_0. \quad (6.7)$$

В момент $t = 0$ замкнем ключ K . В этот момент ($t = 0$) $U_0 = 0$, но по замкнутому контуру R – C через ключ K потечет ток i , и тогда ДУ будет $Ri + u_C = 0$. Так как $i = C \frac{du_C}{dt}$, то ДУ будет

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0. \quad (6.8)$$

Проинтегрировав (6.8), получим, что после короткого замыкания

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (6.9)$$

Из уравнения (6.9) видим, что напряжение u_C изменяется по экспоненциальному закону, уменьшаясь практически до нуля через время $t = (4-5)\tau$.

Ток i в замкнутом контуре $i = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ возникает в момент КЗ ($t = 0$) скачкообразно, принимая значение $-\frac{U_0}{R}$, а затем убывает по тому же экспоненциальному закону. Так как это ток разряда конденсатора, то знак его отрицательный. Энергия $W_C = \frac{CU_0^2}{2}$, запасенная в электрическом поле конденсатора, расходуется на нагрев сопротивления R .

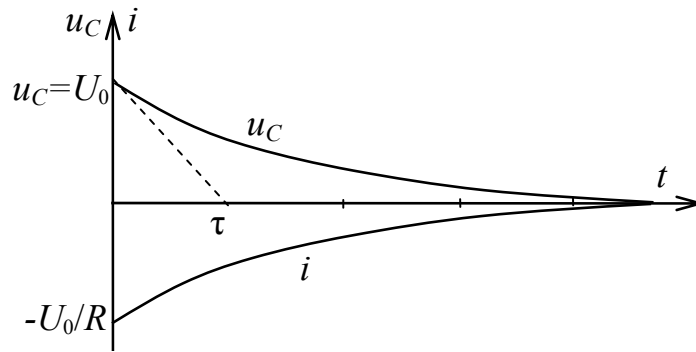


Рис. 6.4. Разряд конденсатора

Важное замечание! В § 6.2 и 6.3 мы рассматривали протекание переходного процесса при коротком замыкании на участке электрической цепи (на участке $R-L$ и $R-C$). Анализировали переходные процессы в замкнутых контурах $R-L$ и $R-C$, образовавшихся в результате короткого замыкания. Но мы не анализировали переходный процесс в остальной части электрической цепи, оставшейся подсоединенной к источнику после короткого замыкания.

Используя метод эквивалентного генератора, изобразим электрическую цепь, в которой произошло короткое замыкание на участке $R-L$ (рис. 6.5).

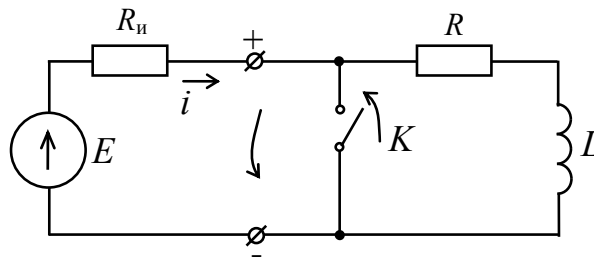


Рис. 6.5. Короткое замыкание цепи

Сопротивление $R_{и}$ отражает оставшуюся часть электрической цепи, кроме участка $R-L$. До короткого замыкания ($t = 0-$) ток в цепи $i = \frac{E}{R_{и} + R} = I_0$. После короткого замыкания ($t = 0+$) установившийся

ток в цепи будет $I_{кз} = \frac{E}{R_{и}}$. В том случае, если $R_{и} \ll R$, то $I_{кз} \gg I_0$,

что может привести к тяжелой аварии и даже «выходу из строя» самого генератора (источника ЭДС E).

Это целиком относится и к короткому замыканию на участке $R-C$ цепи.

Вывод! Короткие замыкания в любой электрической цепи постоянного и переменного тока весьма опасны для элементов электрической цепи.

6.4. Переходный процесс при размыкании цепи

При размыкании цепи, например, при отключении цепи $R-L$ или цепи $R-C$ от источника. Рассмотрим переходный процесс в простейшей электрической цепи $R-L$ при отключении ее от источника постоянного тока с ЭДС E , как показано на рис. 6.6.

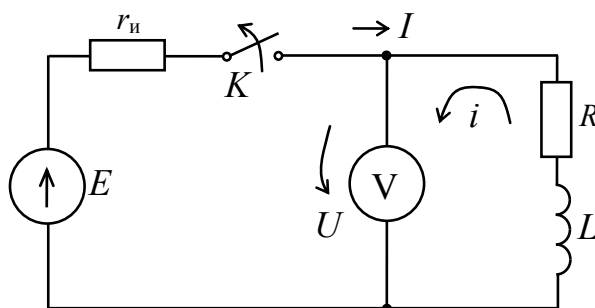


Рис. 6.6. Размыкание цепи $R-L$

Для измерения напряжения в цепи установлен вольтметр V . Пусть цепь имеет следующие параметры: $U = 200$ В, $R = 200$ Ом, $L = 10$ Гн, сопротивление вольтметра $r_v = 5$ кОм. По цепи протекает ток $I = \frac{U}{R} = \frac{200}{200} = 1$ А. По первому закону коммутации $i(0-) = i(0+)$, в момент отключения цепи $R-L$ (размыкание ключа K) ток в контуре $R-L$ $i = I = 1$ А. В этот момент напряжение на зажимах вольтметра будет $U_v = I r_v = 1 \cdot 5000 = 5000$ В. Такое напряжение и такой ток вольтметра окажутся «смертельными» для вольтметра. Поэтому, чтобы не случилось повреждения вольтметра, перед отключением цепи $R-L$ от источника вольтметр необходимо отключать.

Вопросы

6.1. Возникновение переходных процессов

1. Сущность переходных процессов.
2. Опасны ли переходные процессы для электрооборудования?

3. Причины возникновения переходных процессов.
4. Первый закон коммутации (ток в индуктивности).
5. Второй закон коммутации (напряжение на емкости).
6. Какие уравнения используют при расчетах переходных процессов?

6.2. Короткое замыкание в цепи $R-L$ на постоянном токе

1. Схема участка цепи $R-L$ с ключом K на входе.
2. Энергия магнитного поля в индуктивности L .
3. Дифференциальное уравнение по второму закону Кирхгофа в момент замыкания ключа (момент времени $t = 0+$).
4. Дифференциальное уравнение по второму закону Кирхгофа сразу после замыкания ключа (момент времени $t = 0-$).
5. Экспоненциальные уравнения изменения тока i и ЭДС e_L во времени.

6. Графики $i = f(t)$ и $e_L = f(t)$.

7. На что расходуется энергия, запасенная в магнитном поле?

6.3. Короткое замыкание в цепи $R-C$ на постоянном токе

1. Схема участка цепи $R-C$ с ключом K на входе.
2. Энергия электрического поля конденсатора.
3. Уравнение по второму закону Кирхгофа до замыкания ключа K .
4. Дифференциальное уравнение сразу после замыкания ключа.
5. Экспоненциальные уравнения изменения $u_C = f(t)$ и $i = f(t)$.

Графики $u_C = f(t)$ и $i = f(t)$.

6. На что расходуется энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора?

7. Опасность короткого замыкания для электрической цепи.

6.4. Переходный процесс при размыкании цепи

1. Схема замещения цепи постоянного тока $R-L$ с включенным вольтметром к катушке $R-L$.
2. Напряжение U при замкнутом ключе.
3. Напряжение U на вольтметре при размыкании ключа.
4. Опасность для прибора.

ГЛАВА 7 ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ЭДС И ТОКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

7.1. Общие сведения

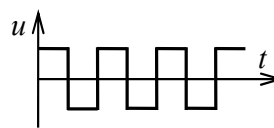
Самой простой формой периодического процесса являются синусоидальные колебания. В энергетических системах это наиболее экономичные и удобные в эксплуатации формы передачи и использования электрической энергии. Поэтому в электроэнергетических системах принимаются различные меры для поддержания синусоидальной формы переменных токов и напряжений и устранения различных отклонений от синусоидальной формы. Нарушения синусоидальной формы напряжений и токов приводят к нарушениям различных технологических процессов, к снижению КПД механизмов, к перегревам машин и других электротехнических устройств.

Однако в электронике и микропроцессорной технике, в электросвязи, в устройствах электроавтоматики, которые также являются электротехническими устройствами, используются несинусоидальные токи и напряжения, что обусловлено самим рабочим процессом, принципом действия этих электронных устройств. И мы более подробно будем изучать эти несинусоидальные процессы в курсе «Электроника и микропроцессорная техника». А в этой главе мы познакомимся с общими понятиями, связанными с периодическими несинусоидальными процессами.

7.2. Причины возникновения периодических несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений

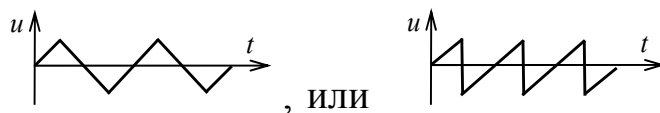
1. *Линейные электрические цепи.* Они не искажают форму электрического тока и напряжения. Следовательно, в линейных электрических цепях причиной несинусоидальных токов и напряжений может быть только несинусоидальное напряжение (ЭДС), приложенное к линейной электрической цепи. Имеется целый класс генераторов, в основном электронных, которые генерируют несинусоидальные напряжения.

Например: мультивибратор, который генерирует напряжение



прямоугольной формы, как показано на графике, или генератор линейно изменяющейся формы напряжения, как пока-

зано на графике
ры других форм.



, или

, и генерато-

2. Нелинейные электрические цепи. Достаточно в цепи одного нелинейного элемента, у которого нелинейная вольтамперная характеристика $u = f(i)$, или ампервольтная характеристика $i = f(u)$, то вся цепь становится нелинейной. Например, в цепь включен полупроводниковый диод, как показано на рис. 7.1 и 7.2.

Так как диод имеет одностороннюю проводимость, то он пропускает в нагрузку только положительные полуволны тока от источника в R_H , как показано на временных диаграммах на рис. 7.3.

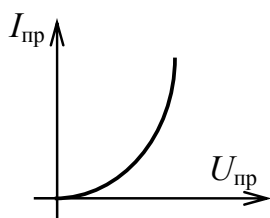


Рис. 7.1. АВХ диода

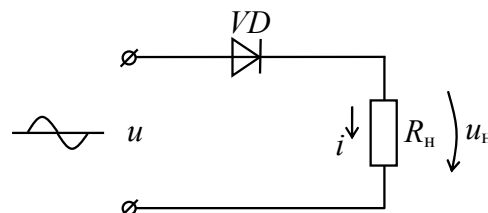


Рис. 7.2. Цепь с полупроводниковым диодом

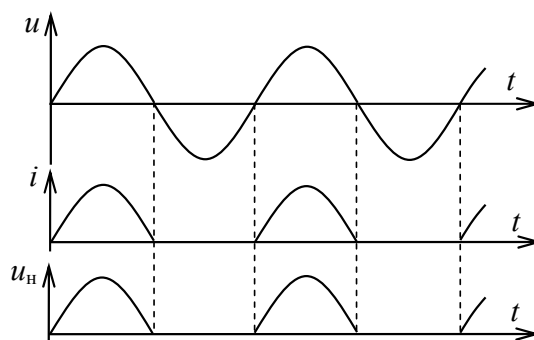


Рис. 7.3. Временные диаграммы

7.3. Представление несинусоидальных величин

1. Наиболее широко используется представление несинусоидальных напряжений и токов в виде временных графиков, часто называемых *временными диаграммами*. Мы уже использовали этот метод на рис. 7.3. Временные диаграммы позволяют визуально представить все изменения исследуемого параметра процесса во времени. Это позволяет легче понять физические явления в электрической цепи. Поэтому метод временных диаграмм широко используется в электронике.

2. Вторым методом представления несинусоидальных токов и напряжений – это разложение несинусоидальных величин в ряд Фурье. В общем случае уравнение этого ряда

$$u = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots,$$

где U_0 – постоянная составляющая; $U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ – первая гармоника; $U_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2)$ – вторая гармоника, и т. д.; k – номер гармоники.

При расчетах, измерениях используются действующие значения напряжения, тока, действующие значения ЭДС для каждой гармоники, например,

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2},$$

где $U_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}}; U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}; \dots U_n = \frac{U_{nm}}{\sqrt{2}}.$

Аналогично для токов и ЭДС.

Среднее значение напряжения $U_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = U_0.$

Среднее значение мощности на приемнике

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \dots$$

Вопросы

7.1. Общие сведения

1. Нарушения синусоидальной формы токов и напряжений в энергетических системах, в электротехнике. К чему приводят?
2. А в электронике и микропроцессорной технике?

7.2. Причины возникновения периодических несинусоидальных ЭДС, токов и напряжений

1. В линейных электрических цепях.
2. В нелинейных электрических цепях, где источники имеют синусоидальные ЭДС.

7.3. Представление несинусоидальных величин

1. При помощи временных графиков (временных диаграмм).
2. Разложение несинусоидальных величин в ряд Фурье, т. е. в ряд гармонических составляющих и постоянной составляющей.
3. При расчетах используют действующие значения каждой гармоники.

ГЛАВА 8 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ

8.1. Общие сведения

1. До сих пор мы рассматривали линейные цепи, в которых сопротивление цепи не зависит от величины приложенного к цепи напряжения или от величины протекающего по цепи тока. В таких случаях все элементы цепи имеют *линейные* вольтамперные характеристики (ВАХ) $u = f(i)$ или ампервольтные характеристики (АВХ) $i = f(u)$. Если же хотя бы один элемент цепи *имеет нелинейную зависимость* $u = f(i)$ или $i = f(u)$, то такая цепь является нелинейной.

2. Как линейные, так и нелинейные элементы в электрической цепи могут быть включены и последовательно, и параллельно, и смешанно.

3. При наличии нелинейных элементов *расчет* электрических цепей значительно *усложняется* по сравнению с расчетом линейных цепей такой же конфигурации, так как электрическое сопротивление цепи непостоянно – оно зависит от напряжения и протекающего тока. Поэтому нелинейные электрические цепи часто рассчитывают и анализируют при помощи графических построений, или графоаналитическим методом. Естественно, при этом используются законы Ома, Кирхгофа и другие физические закономерности.

4. Следовательно, для расчета и анализа нелинейных цепей необходимо знать параметры линейных элементов и ВАХ (АВХ) нелинейных элементов.

Для конкретной нелинейной электрической цепи параметры и ВАХ (АВХ) нелинейных элементов определяются *расчетным* или (часто) *экспериментальным* путем.

5. *Нелинейные элементы* широко используются в различных областях *электротехники*, а электроника почти целиком базируется на самых различных нелинейных элементах и весьма сложных нелинейных цепях (различные электронные устройства).

Перечень нелинейных конкретных элементов, их назначение и ВАХ (АВХ) можно найти в различной справочной литературе по электротехнике и электронике.

8.2. Нелинейные элементы, их АВХ и простейшие нелинейные цепи

Нелинейные элементы характеризуются нелинейными вольтамперными характеристиками $u = f(i)$ или нелинейными ампервольтными характеристиками $i = f(u)$. Некоторые элементы имеют симметричные нелинейные характеристики (ВАХ и АВХ), как, например, термисторы, приборы тлеющего разряда и др., а часть элементов имеют несимметричные характеристики (ВАХ и АВХ), такие, как, например, диоды, транзисторы, тиристоры, триоды и др. Для примера на рис. 8.1 приведены: симметричная АВХ (характеристика 1) и несимметричная АВХ (характеристика 2).

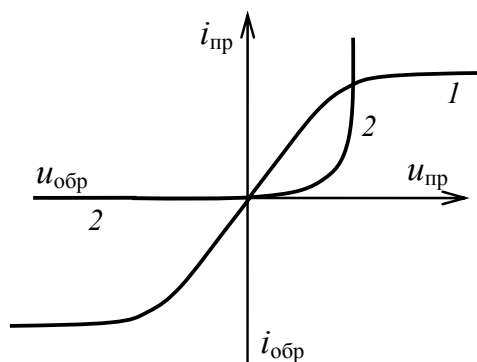


Рис. 8.1. АВХ элементов

Сопротивление нелинейных элементов с *симметричными* АВХ (ВАХ) 1 *не зависит* от направления электрического тока. Поэтому для них безразлично, какой ток (переменный или постоянный) через них протекает. И в том, и в другом случае они работают одинаково, т. е. их сопротивление изменяется *одинаково, по величине тока*, независимо от направления тока.

Сопротивление *нелинейного элемента* с несимметричной АВХ (ВАХ) 2 *зависит от направления тока*. Так, на рис. 8.1 АВХ 2 в прямом направлении имеет $R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}}$ – малое сопротивление, а в обратном направлении $R_{\text{обр}}$ – большое сопротивление.

Поэтому такие нелинейные элементы хорошо пропускают ток в прямом направлении, а в обратном направлении – очень плохо, или совсем не пропускают электрический ток, т. е. такие элементы обладают вентильными свойствами. К ним относятся электронные и полу-

проводниковые диоды, которые используются в различных выпрямительных устройствах как в электротехнике, так и в электронике.

Рассмотрим *примеры* использования нелинейных элементов в некоторых простейших цепях:

1. Защита какого-либо устройства, например, двигателя, от перегрева. Выбираем надежный элемент «слежения» за нагревом – термистор. Его сопротивление зависит от температуры, как показано на рис. 8.2.

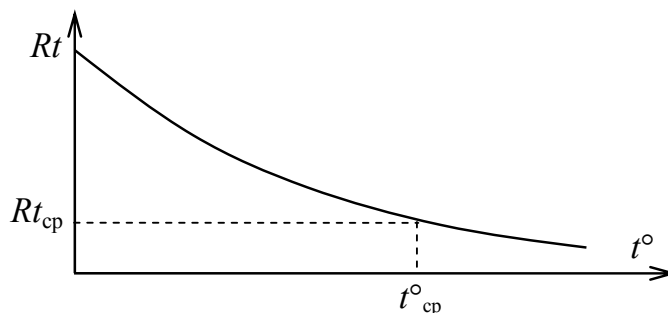


Рис. 8.2. Зависимость сопротивления термистора от температуры

Включим реле защиты двигателя в цепь с термистором, как показано на рис. 8.3. Нормально закрытый контакт P .

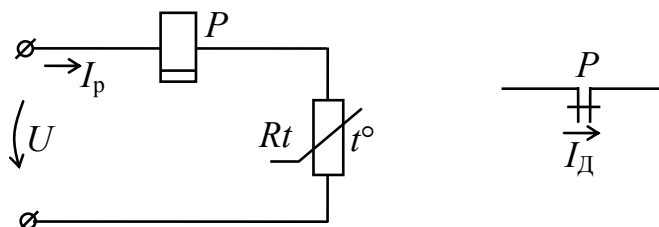


Рис. 8.3. Схема ЭМ реле с термистором

Термистор R_t устанавливают в место контроля температуры двигателя. При температуре $t^o < t_{cp}^o$ ток $I_p = \frac{U}{R_p + R_t} < I_{p.cp}$ (тока срабатывания). При этом реле не включено, нормально замкнутый контакт реле P замкнут, по нему протекает ток I_d , и двигатель работает.

При нагреве двигателя до $t^o > t_{cp}^o$ ток $I_p = \frac{U}{R_p + R_{t_{cp}}} > I_{p.cp}$, и реле P срабатывает, размыкает нормально замкнутый (НЗ) контакт реле P , обесточивая двигатель, тем самым защищая его от перегрева.

2. Простейший однофазный однополупериодный выпрямитель на полупроводниковом диоде. Обозначение и АВХ диода приведены на рис. 8.4. Для примера, на рис. 8.4 показана АВХ маломощного диода. А спектр выпускаемых промышленностью диодов весьма широк и информацию о них, в том числе и АВХ, можно найти в справочниках. Как видно из АВХ на рис. 8.4, сопротивление диода в прямом направлении тока $r_{пр}$ мало: $r_{пр} = \frac{U_{пр}}{I_{пр}} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-3}} = 10 \text{ Ом}$, а в обратном направлении велико: $r_{обр} = \frac{20}{2 \cdot 10^{-6}} = 10 \cdot 10^6 \text{ Ом}$. Это различие $r_{пр}$ и $r_{обр}$ обеспечивает диоду вентильные (выпрямительные) свойства. Простейшая цепь с полупроводниковым диодом показана на рис. 8.5. На вход выпрямителя подано синусоидальное напряжение $u(t)$. При положительных полуволнах $u(t)$ диод пропускает ток i_d в прямом направлении и на сопротивлении нагрузки R_n возникает напряжение $u_d = i_d R_n$. При отрицательной полуволне $u(t)$ диод VD практически не пропускает ток, т. е. $i_d \approx 0$, и на резисторе R_n $u_d \approx 0$.

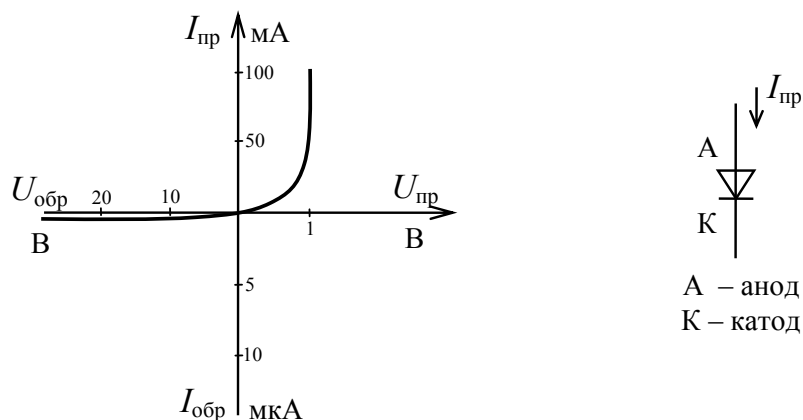


Рис. 8.4. АВХ и обозначение полупроводникового диода на схемах

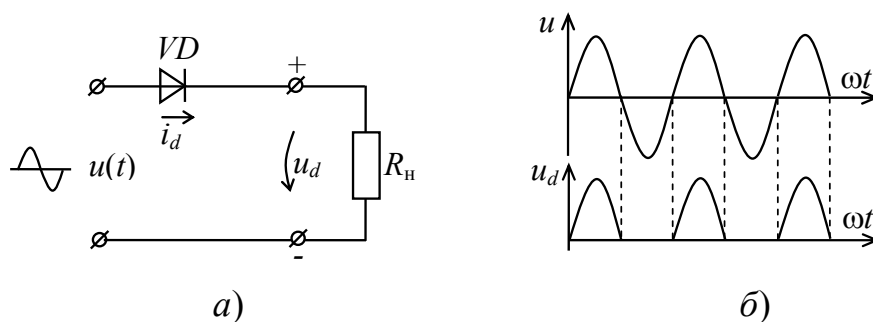


Рис. 8.5. Однополупериодный выпрямитель:
а – схема; б – временные диаграммы

В электротехнике и в электронике на основе диодов создаются различные выпрямительные устройства и другие устройства с использованием диодов. Основательно эти устройства мы рассмотрим в курсе «Электроника и микропроцессорная техника».

8.3. Графический расчет цепей с нелинейными элементами

1. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ампер-вольтные характеристики (АВХ) часто невозможно математически описать с достаточной точностью. Поэтому для анализа работы нелинейных цепей и для расчета их рабочего режима применяются графические методы расчета. Но для графического расчета надо иметь ВАХ или АВХ нелинейного элемента, которые часто получают экспериментально или находят в соответствующих справочниках. Тогда расчет цепи графическим методом оказывается несложным.

2. Пусть нам дана электрическая цепь с последовательно соединенными линейным резистором R и нелинейным элементом с известным АВХ $I = f(U)$, т. е. $r = f(I)$ (рис. 8.6). Требуется графически рассчитать цепь, т. е. определить ток I при заданном напряжении U . Нам известна $I = f(U)$, а также АВХ $I = \frac{U_R}{R}$ для линейного резистора.

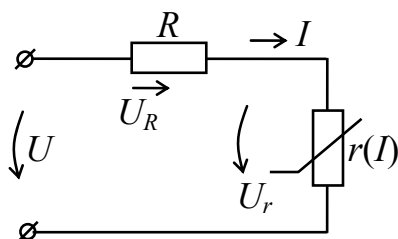


Рис. 8.6. Цепь с нелинейным элементом

Так как для последовательного соединения элементов цепи ток I во всей цепи один и тот же, а напряжение $U = U_R + U_r$, то суммарную АВХ можно найти путем сложения значений U_R и U_r при различных значениях тока I в цепи, т. е. $I = f(U_R + U_r)$.

Следовательно, имея АВХ (ВАХ) всех элементов и всей цепи, можно решать любые задачи. Например, при заданном напряжении цепи $U = U_0$ легко определим ток в цепи I_0 и напряжения U_{R0} и U_{r0} при этом токе.

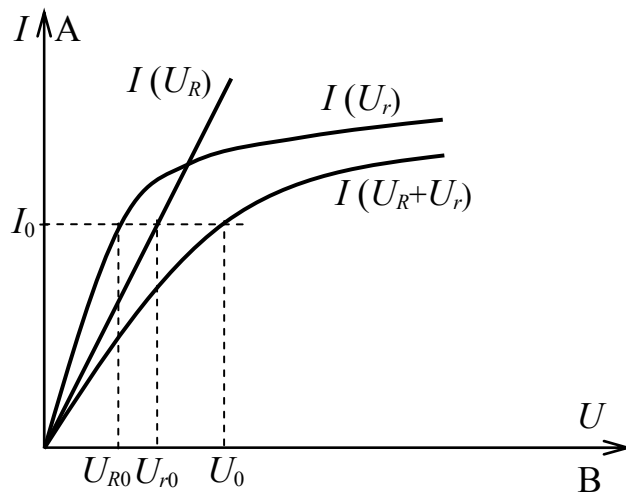


Рис. 8.7. Графический расчет цепи с НЭ

3. Аналогично поступаем при параллельно соединенных приемниках. Пусть нам дана цепь с двумя параллельно соединенными нелинейными элементами $r_1(I_1)$ и $r_2(I_2)$, как показано на рис. 8.8. По первому закону Кирхгофа $I = I_1 + I_2$. Следовательно, для определения зависимости $I(U)$ необходимо просуммировать I_1 и I_2 для всех значений U . Таким образом, на рис. 8.9 получена АВХ для суммарного тока I . Пользуясь этими характеристиками, можно для любого значения приложенного к цепи напряжения U_0 найти значения I_0 , I_{10} , I_{20} .

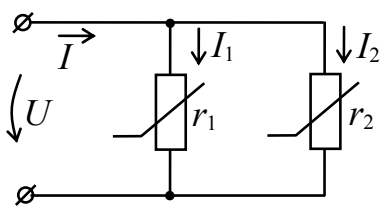


Рис. 8.8. Цепь с параллельным соединением НЭ

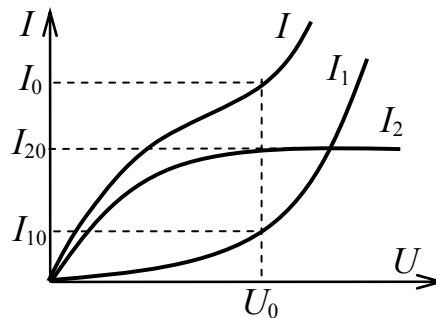


Рис. 8.9. Графический расчет цепи с параллельно соединенными приемниками

8.4. Графо-аналитический расчет цепей с нелинейными элементами

Графический расчет можно применять при любом виде ВАХ и АВХ. Однако при этом точность расчета невелика. И главное, если

цепь сложная, то получаются громоздкие построения, а точность графического расчета еще больше уменьшается.

Однако часто встречаются случаи, когда рабочие участки ВАХ (АВХ) нелинейных элементов в цепи можно заменить прямыми линиями (линеаризовать). В этих случаях нелинейную цепь заменяют схемой замещения с линейными элементами. Рассмотрим идею такой замены. На рис. 8.10 приведены два вида АВХ нелинейных элементов НЭ. На АВХ указаны рабочие точки M , которые находятся на почти линейных участках АВХ. Эти участки заменим прямыми линиями. При такой замене используют понятие дифференциального сопротивления $r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Так, для рис. 8.10, а $r_d = \frac{U_p - U_0}{I_p}$, а для рис. 8.11, б $r_d = \frac{U_p + U_0}{I_p}$.

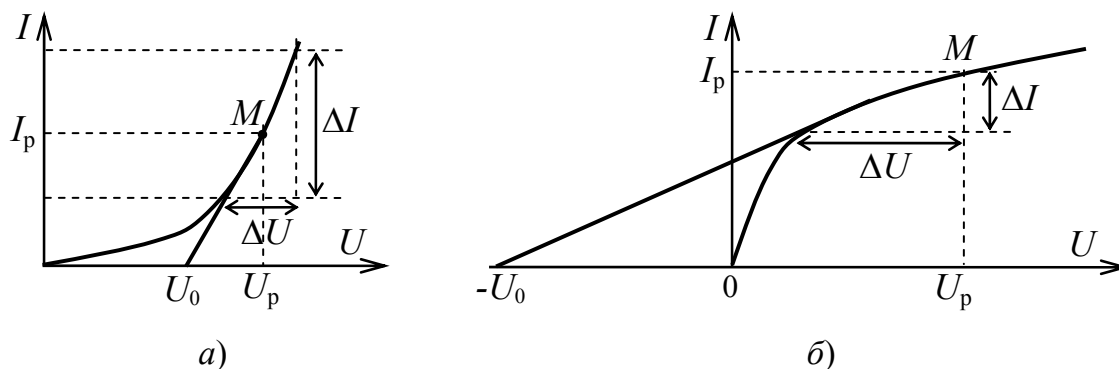


Рис. 8.10. АВХ нелинейных элементов НЭ

А так как рабочий диапазон изменений тока в цепи с нелинейным элементом ΔI (или диапазон изменения напряжения НЭ ΔU), то нелинейный элемент мы можем в цепи заменить линейным элементом с сопротивлением r_d . И тогда мы эту цепь можем решать известными методами решения линейных цепей (в пределах линейного участка АВХ или ВАХ). Для рис. 8.10 $r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Вопросы

8.1. Общие сведения

1. Что такое нелинейная цепь?
2. Что такое нелинейный элемент?
3. Способы включения нелинейных элементов в электрическую цепь.

4. Способы расчета и анализа цепей с нелинейными элементами.
5. Использование нелинейных элементов.

8.2. Нелинейные элементы, их ВАХ и простейшие нелинейные цепи

1. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ампер-вольтные характеристики (АВХ) нелинейных элементов.
2. Симметричные и несимметричные ВАХ и АВХ. Примеры графиков таких элементов.
3. Сопротивления нелинейных элементов в зависимости от направления тока (полярности напряжения).
4. Примеры использования конкретных нелинейных элементов:
 - а) в устройстве защиты;
 - б) в выпрямителе тока.

8.3. Графический расчет цепи с нелинейным элементом

1. Электрическая цепь с нелинейным элементом.
2. Графический расчет цепи с последовательным (параллельным) соединением приемников.

8.4. Графоаналитический расчет цепей с нелинейными элементами

1. Идея метода.
2. Пределы использования этого метода.
3. Пример использования этого метода при «вогнутой» АВХ.
4. Пример для «выпуклой» АВХ.

ГЛАВА 9 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

9.1. Силовое и индукционное действие магнитного поля

1. Как известно из курса физики и как ранее упоминалось в данном издании, если поместить контур из проводников (катушку, как его называют) в переменное магнитное поле или перемещать контур в постоянном магнитном поле, то при пересечении так называемых магнитно-силовых линий в контуре будет наводиться ЭДС и по замкнутому контуру потечет электрический ток.

2. Это *индукционное действие магнитного поля* широко используется в электротехнике для создания различных электромагнитных устройств – *генераторов* постоянных и переменных ЭДС, *трансформаторов* для преобразования величин переменных электрических напряжений и токов, различных приборов контроля, управления и автоматизации, в магнитных усилителях и т. д.

3. Если же в *магнитное поле* поместить контур с *электрическим током*, проводник с током или какие-либо детали из ферромагнитных материалов, то на них будет оказано со стороны магнитного поля *силовое воздействие* (притягивающее, отталкивающее, вращающее).

Это силовое воздействие магнитного поля широко используется в электротехнике для создания *различных электромагнитных устройств* – *электродвигателей, электромагнитов, электромагнитных реле и пускателей, измерительных приборов и т. д.*

4. Электротехнические устройства, действие которых основано на использовании индукционного или силового действия магнитного поля, называются электромагнитными.

9.2. Магнитные цепи

1. Также как электрические цепи обеспечивают протекание электрического тока I по замкнутому контуру, так и магнитные цепи обеспечивают протекание магнитного потока Φ в нужном направлении по замкнутому контуру.

2. *Магнитная цепь* – это совокупность источников магнитного потока Φ и ферромагнитных или других тел и сред (магнитопроводов), через которые магнитный поток замыкается.

И если в электрической цепи медные провода обеспечивают надежное протекание электрического тока, то в магнитной цепи *ферро-*

магнитные сплавы обеспечивают надежное протекание магнитного потока по замкнутому контуру между источником и приемником магнитной цепи.

3. Наиболее простой магнитной цепью является обмотка, витки которой намотаны на замкнутый ферромагнитный сердечник (так называемая катушка с ферромагнитным сердечником). По проводам обмотки протекает электрический ток, который создает магнитный поток Φ , в основном замыкающийся по ферромагнитному сердечнику (рис. 9.1).

4. Назначение ферромагнитных сердечников: они уменьшают сопротивление магнитному потоку по сравнению с воздушным пространством. В ферромагнитном сердечнике проводимость магнитного потока *в тысячи раз больше*, чем проводимость воздуха, и поэтому магнитный поток концентрируется в сердечнике. Благодаря этому можно создать магнитный поток требуемой интенсивности и направленности. При помощи ферромагнитных сердечников создаются самые различные магнитные цепи – разветвленные, неразветвленные, с зазором и т. п.

9.3. Катушка с ферромагнитным сердечником

Намотав обмотку из изолированного провода на замкнутый контур из ферромагнитного материала, получим катушку с ферромагнитным сердечником, как показано на рис. 9.1. Это нелинейный элемент цепи переменного тока. При подключении катушки к источнику переменного тока по проводу обмотки (по «виткам» обмотки) протекает переменный ток, который создает переменное магнитное поле. Основной магнитный поток Φ замыкается по контуру сердечника, так как проводимость сердечника магнитного потока во много раз меньше, чем проводимость воздуха. И только небольшая часть магнитного потока Φ_p замыкается по воздуху. Этот поток Φ_p называется потоком рассеяния.

Ферромагнитный сердечник создает магнитную цепь с переменными намагничивающими силами. Такие магнитные цепи очень широко используются в различных электротехнических устройствах – трансформаторах, генераторах, двигателях, электромагнитных реле и т. п. Поэтому важно понимать протекающие физические процессы в катушке с ферромагнитным сердечником, важно ознакомиться с методами анализа электрических цепей с ферромагнитными сердечниками и использования их в различных электромагнитных устройствах.

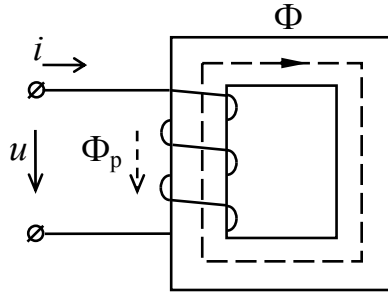


Рис. 9.1. Катушка с ферромагнитным сердечником

Подключенное к обмотке («катушке») напряжение вызывает ток i , который создает магнитные потоки Φ и Φ_p . Поток Φ сцепляется со всеми витками обмотки, а поток Φ_p проходит по воздуху.

Так как магнитное сопротивление воздуха не зависит от тока, то можно считать, что интенсивность магнитного поля рассеяния, пропорциональная силе тока катушки (как в обычной индуктивности без сердечника), т. е. потокосцепление рассеяния $\psi_p = L_p i$, где L_p – коэффициент пропорциональности. А основной магнитный поток Φ замыкается по контуру сердечника, пронизывая все витки обмотки катушки. Поэтому потокосцепление основного потока $\psi = w\Phi$, где w – число витков.

С целью упрощения анализа будем рассматривать потокосцепления $\psi_p = L_p i$ и $\psi = w\Phi$ отдельно.

Тогда по второму закону Кирхгофа запишем уравнение для мгновенных значений

$$u = (-e) + (-e_p) + ri, \quad (9.1)$$

где $e = -\frac{d\psi}{dt} = -w\frac{d\Phi}{dt}$ – ЭДС, наводимая в обмотке (в «катушке») основным потоком Φ ;

$e_p = -\frac{d\psi_p}{dt} = -L_p \frac{di}{dt}$ – ЭДС, наводимая потоком Φ_p ;

r – сопротивление провода катушки.

Обозначим $-e = u'$, тогда приложенное к катушке напряжение по второму закону Кирхгофа

$$u = u' + L_p \frac{d\Phi_p}{dt} + ri. \quad (9.2)$$

Это уравнение (9.2) показывает, что реальную катушку с ферромагнитным сердечником при анализе можно заменить (условно) линейной обмоткой, т. е. реальной индуктивностью с L_p и r , и идеализированной нелинейной катушкой с сердечником, у которой число витков w , а $r = 0$.

Схема замещения реальной катушки с ферромагнитным сердечником теперь, в соответствии с уравнением (9.2), будет как на рис. 9.2.

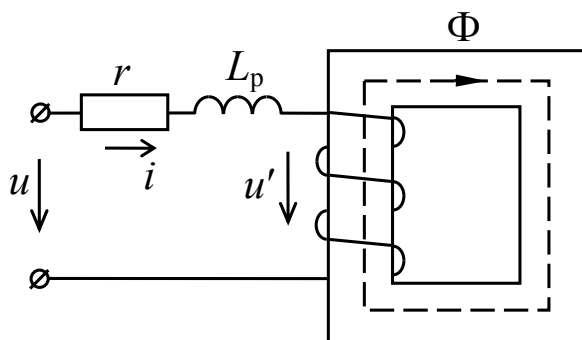


Рис. 9.2. Схема замещения реальной катушки

В такой идеализированной катушке зависимость между u' и i нелинейная, и ее нельзя характеризовать постоянной индуктивностью L .

Как было сказано выше, сопротивление магнитному потоку Φ_p воздуха во много раз больше, чем сопротивление ферромагнитного сердечника магнитному потоку Φ . Поэтому часто для упрощения анализа принимают $L_p = 0$, $r = 0$.

Тогда при подключении к катушке синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$ в магнитной цепи возникает синусоидальный магнитный поток Φ . Действительно, если в уравнении (9.2) принять $r = 0$, $L_p = 0$, то $u = u' = -e = w \frac{d\Phi}{dt}$. Из этого уравнения для синусоидального напряжения u , после преобразований действующего значения приложенного напряжения $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, получается зависимость

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w}. \quad (9.3)$$

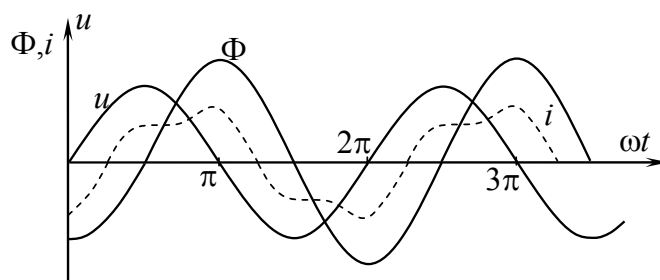


Рис. 9.3. Временные диаграммы

В заключение следует отметить, что при синусоидальном напряжении u ток i в катушке несинусоидален, а синусоидальный магнитный поток Φ отстает от напряжения u на 90° , т. е. на $\frac{\pi}{2}$, как показано на рис. 9.3.

Вопросы

9.1. Силовое и индукционное действие магнитного поля

1. Индукционное действие магнитного поля.
2. Где используется индукционное действие магнитного поля?
3. Силовое действие магнитного поля.
4. Где используется силовое действие магнитного поля?
5. Какие электротехнические устройства называются электромагнитными?

9.2. Магнитные цепи

1. Что такое магнитная цепь?
2. Назначение магнитной цепи.
3. Из каких материалов создают магнитные цепи?
4. Почему магнитный поток почти целиком концентрируется в сердечнике, а не в воздухе?

9.3. Катушка с ферромагнитным сердечником

1. Устройство катушки с ферромагнитным сердечником.
2. Основной магнитный поток Φ и поток рассеивания Φ_p .
3. Применение ферромагнитных сердечников в электротехнике.
4. Потокосцепление рассеяния $\psi = L_p i$ и потокосцепление основного потока $\psi = w\Phi$.
5. Схема замещения реальной катушки, где отражены r , L_p , Φ .
6. Упрощенная схема замещения реальной катушки, где $r = 0$, $L_p = 0$. Почему?
7. Временные диаграммы u , i , Φ .

ГЛАВА 10 ТРАНСФОРМАТОРЫ

10.1. Общие сведения

1. Трансформатор – это электромагнитный аппарат, который преобразует электрическую энергию переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения одной и той же частоты. Преобразование происходит посредством переменного магнитного поля.

2. Трансформаторы – это наиболее широко применяемые электромагнитные устройства в различных областях электротехники, электроники и информатики, в промышленности, в быту.

3. В энергетике, например, для экономичной передачи электрической энергии от электростанции используют повышающие трансформаторы, которые повышают напряжение, например, в тысячу раз, не изменяя мощности. При этом ток уменьшается в тысячу раз, и потери в проводах высоковольтных линий $\Delta P = I^2 r_{\text{пр}}$ также снижаются.

А у потребителя при помощи понижающего трансформатора снижается напряжение до необходимого для потребителя уровня.

4. Для распределения электрической энергии по разным потребителям, в электротермических устройствах, сварочные трансформаторы и т. п.

По назначению и устройству трансформаторы классифицируют:

а) силовые, у которых номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ может быть от нескольких единиц до нескольких сот кВА;

б) измерительные;

в) многообмоточные;

г) автотрансформаторы;

д) импульсные;

е) повышающие;

ж) понижающие;

з) сварочные.

10.2. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

Устройство. Трансформатор состоит из ферромагнитного сердечника (магнитопровода), на котором намотаны обмотки. Бывают двух-, трех- и многообмоточные трансформаторы. Обмотка, которая

подсоединяется к источнику переменного тока, называется *первичной обмоткой*. Обмотки, отдающие энергию во внешние цепи (приемникам), называются *вторичными обмотками*.

Обмотки наматывают на сердечник (магнитопровод) обычно медным (иногда алюминиевым) изолированным проводом круглого, или, для мощных трансформаторов, прямоугольного сечения.

Сердечники набирают из изолированных пластин электротехнической стали О-образной или Ш-образной формы толщиной 0,5 или 0,35 мм.

Форма поперечного сечения набранного сердечника для мощных трансформаторов круглая \bigcirc , а для маломощных – квадратная \square .

Охлаждение трансформаторов: для маломощных – воздушное, для мощных – масляное охлаждение.

Принцип действия. На рис. 10.1 приведена электрическая схема двухобмоточного трансформатора, подключенного к источнику синусоидального тока с $e_{\text{и}}$ и работающего на нагрузку $Z_{\text{н}}$. Под воздействием приложенного к первичной обмотке синусоидального напряжения u_1 в первичной обмотке W_1 протекает ток i_1 . Этот ток i_1 создает в первичной обмотке с числом витков W_1 магнитный поток $\Phi_{1\sim}$.

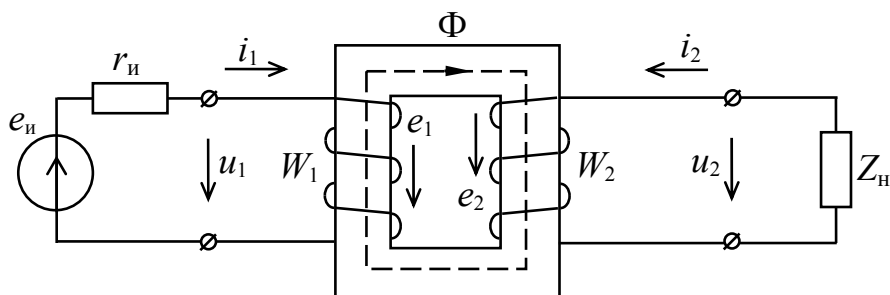


Рис. 10.1. Электрическая схема двухобмоточного трансформатора

Магнитный поток $\Phi_{1\sim}$, протекая по замкнутому ферромагнитному сердечнику, пересекает витки вторичной обмотки W_2 и наводит в ней ЭДС e_2 , под действием которой по замкнутому вторичному контуру через нагрузку $Z_{\text{н}}$ протекает ток i_2 . Этот ток i_2 создает во вторичной обмотке W_2 магнитный поток $\Phi_{2\sim}$, который также протекает через замкнутый контур сердечника. В результате взаимодействия этих двух потоков $\Phi_{1\sim}$ и $\Phi_{2\sim}$ создается общий магнитный поток Φ , который пересекает витки W_1 и W_2 и индуцирует в них e_1 и e_2 (см. рис. 10.1).

При детальном исследовании трансформаторов иногда учитывают активные сопротивления r_1 и r_2 обмоток и потоки рассеяния по воздуху Φ_{p1} и Φ_{p2} .

Но обычно трансформаторы проектируют так, чтобы потоки рассеяния Φ_p были малы и произведения токов i на сопротивление провода r , т. е. $i_1 r_1$, $i_2 r_2$ были малы. Поэтому с погрешностью не более 5 % и для реального трансформатора уравнения электрического состояния можно принять $u_1 = -e_1$ и $u_2 = e_2$, где $e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$ и $e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$.

Следовательно, коэффициент трансформации (коэффициент преобразования напряжения) трансформатора с допустимой погрешностью можно определить из уравнения

$$K_{21} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (10.1)$$

Отсюда $U_2 = K_{21} U_1$.

Таким образом, в трансформаторе передача электрической энергии из первичной цепи во вторичную цепь осуществляется посредством переменного магнитного поля в сердечнике. При этом первичная и вторичная цепи электрически изолированы друг от друга.

Как ранее было сказано, токи i_1 и i_2 , протекая по обмоткам W_1 и W_2 , создают магнитные потоки $\Phi_{1\sim}$ и $\Phi_{2\sim}$, которые и образуют общий магнитный поток Φ .

Это магнитное состояние для реального трансформатора с небольшой погрешностью определяется уравнением

$$W_1 i_{1x} = W_1 i_1 + W_2 i_2, \quad (10.2)$$

где i_{1x} – ток холостого хода в первичной обмотке при $i_2 = 0$, т. е. при $Z_H = \infty$.

Сравнивая электрическую цепь и магнитную цепь на рис. 10.2, можно обнаружить подобные процессы и закономерности, что обусловлено великим Законом Природы – законом сохранения энергии.

При подключении ЭДС E по электрической цепи протекает ток I , т. е. ЭДС E является источником, создателем электрического тока. $E = I(r_{вн} + R)$ (рис. 10.2, а).

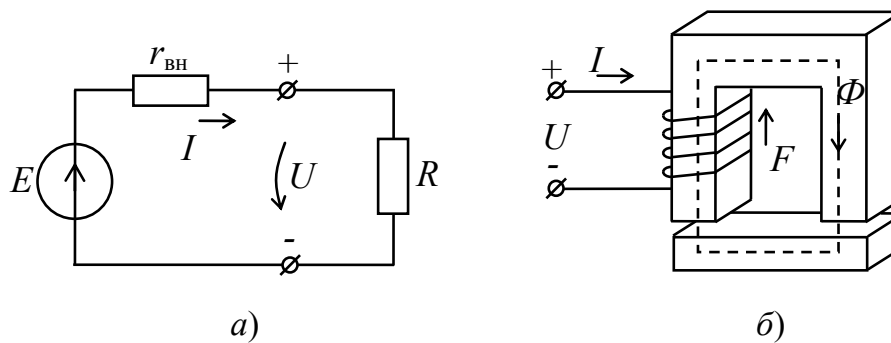


Рис. 10.2. Схемы:
а – электрическая цепь; б – магнитная цепь

При протекании тока I в обмотке электромагнита возникает магнитодвижущая сила (МДС) F , которая создает магнитный поток Φ . В соответствии с законом полного тока для магнитной цепи, эта МДС $F = IW$, где W – число витков обмотки электромагнита (рис. 10.2, б). При достижении F определенного значения якорь электромагнита будет притянут к сердечнику – электромагнит «сработает».

10.3. Внешние характеристики и КПД трансформатора

В электрических схемах принято трансформаторы обозначать, как, например, показано на рис. 10.3 обозначение двухобмоточного трансформатора.

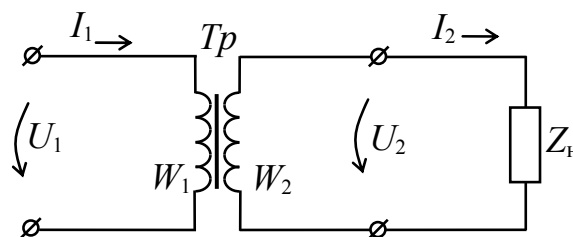


Рис. 10.3. Двухобмоточный трансформатор

Здесь трансформатор по сути своей выполняет роль источника энергии для нагрузки $Z_{\text{н}}$. Поэтому, как и у других электрических цепей, основной характеристикой для цепи питания нагрузки $Z_{\text{н}}$ является внешняя характеристика $U_2 = f(I_2)$. Для вторичной цепи можно даже начертить схему замещения.

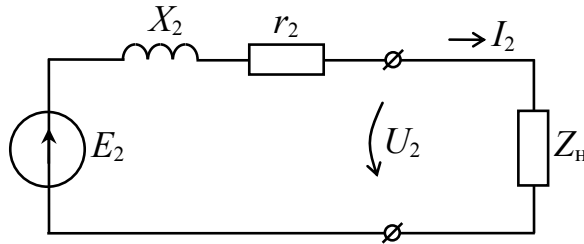


Рис. 10.4. Схема замещения вторичной цепи трансформатора

Внешняя характеристика $U_2 = f(I_2)$ зависит от рода нагрузки и $\cos \varphi$. При емкостной нагрузке U_2 может даже повышаться.

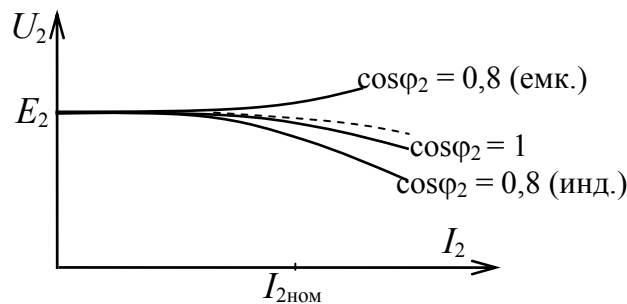


Рис. 10.5. Внешняя характеристика

Для маломощных трансформаторов внешние характеристики можно получить даже экспериментально. Для мощных трансформаторов изменения напряжения U_2 при изменении тока I_2 находятся в пределах точности измерительных приборов. Поэтому для них внешнюю характеристику получают расчетным путем.

Коэффициент полезного действия КПД трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$; $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$.

Если бы трансформатор был бы идеальным, т. е. без потерь энергии, то было бы $P_2 = P_1$ и $\eta = 1$.

Но в реальном трансформаторе есть потери

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{эл}} + P_{\text{с}} + P_{\text{ж}} = P_{\text{эл}} + P_{\text{с}},$$

где $P_{\text{эл}}$ – потери на нагрев проводов обмоток (W_1 и W_2); $P_{\text{с}}$ – потери в сердечнике на перемагничивание и вихревые токи.

Следовательно,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{\Sigma} + P_c)}{P_1} = 1 - \frac{P_{\Sigma} + P_c}{P_1}. \quad (10.3)$$

У мощных трансформаторов $\eta = 0,95-0,995$. Поэтому разность $P_1 - P_2$ сравнима с погрешностью измерительных приборов при непосредственных измерениях мощностей. В связи с этим КПД определяют расчетным путем. Наибольший КПД бывает при мощности нагрузки $S = (0,5-0,7)S_{\text{ном}}$, где S – полная мощность $S = UI$. При этом $\eta \approx 0,995$, а $\cos \varphi_{\text{п}} \approx 1$, как показано на рис. 10.6.

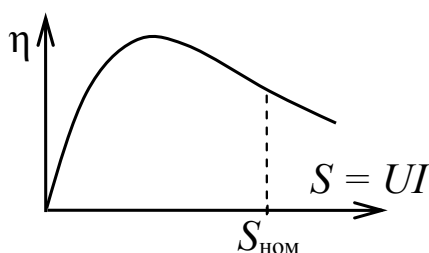


Рис. 10.6. КПД в зависимости от полной мощности S трансформатора

10.4. Типы трансформаторов

Мы рассмотрели простейший однофазный двухобмоточный трансформатор – с одной первичной и одной вторичной обмотками. На практике используют различные типы трансформаторов в зависимости от конкретных предназначений.

1. *Многообмоточные трансформаторы*, для получения нескольких независимых источников питания различных электрических цепей одной частоты. Например, на рис. 10.7 приведена электрическая схема трансформатора с одной первичной и тремя вторичными обмотками, намотанными на одном замкнутом сердечнике.

В соответствии с уравнением (10.1):

$$U_2 = \frac{W_2}{W_1} U_1, \quad U_3 = \frac{W_3}{W_1} U_1, \quad U_4 = \frac{W_4}{W_1} U_1.$$

А магнитное состояние такого многообмоточного трансформатора определяется уравнением (10.2):

$$W_1 \underline{I}_{1x} = W_1 \underline{I}_1 + W_2 \underline{I}_2 + W_3 \underline{I}_3 + W_4 \underline{I}_4. \quad (10.4)$$

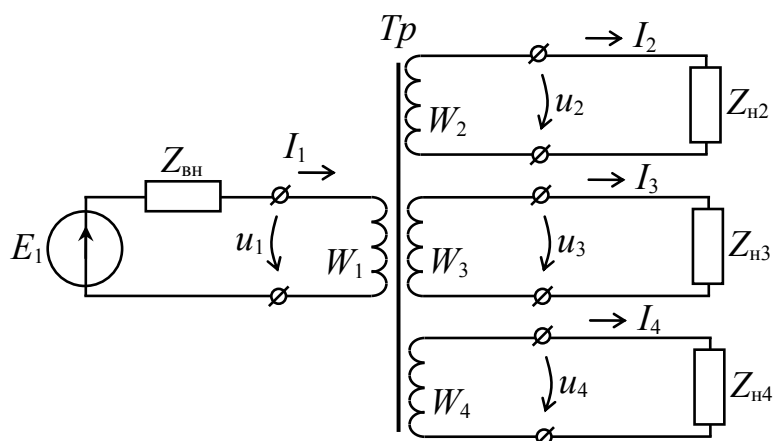


Рис. 10.7. Многообмоточный трансформатор

2. *Трехфазные трансформаторы.* Как ранее было упомянуто, электрическую энергию в основном получают и отправляют потребителям в виде трехфазной системы. Поэтому для передачи трехфазной электрической энергии различным потребителям и питания трехфазных различных электрических устройств широко используются трехфазные трансформаторы.

Трехфазный трансформатор по сути своей состоит из трех однофазных трансформаторов, намотанных на трехстержневой сердечник, как показано на рис. 10.8.

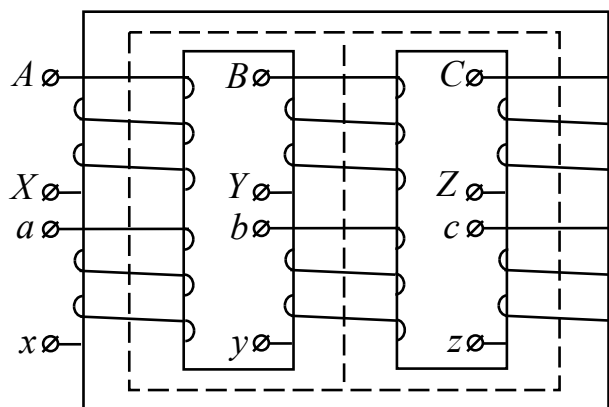


Рис. 10.8. Трехфазный трансформатор

Так как каждая фаза представляет собой, по существу, однофазный трансформатор, то анализ и расчет трехфазных трансформаторов при симметричной нагрузке аналогичен анализу и расчету однофазного трансформатора (для каждой фазы).

Трехфазный трансформатор является источником питания для многих потребителей энергии и устройств трехфазных и однофазных. И соединения обмоток трехфазного трансформатора могут быть разными. Чаще всего это бывают соединения $Y-Y$ (звезда-звезда) или $Y-\Delta$ (звезда-треугольник). Как показывает практика, выгоднее первичные обмотки соединять звездой (рис. 10.9).

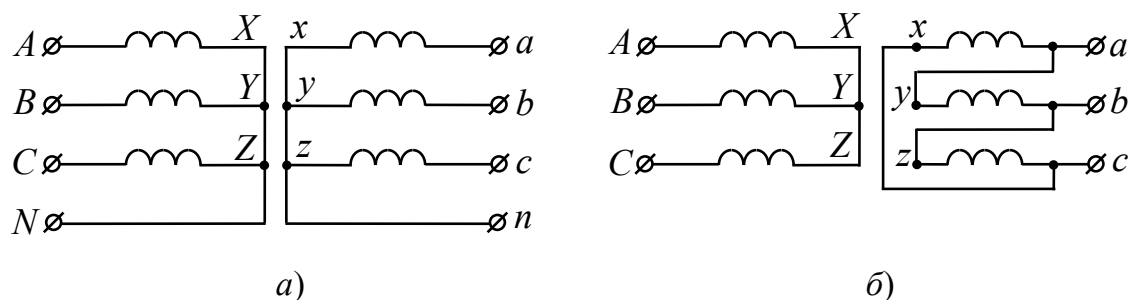


Рис. 10.9. Соединение обмоток:
а – $Y-Y$; б – $Y-\Delta$

Напряжения первичных обмоток \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C сдвинуты друг относительно друга на 120° (рис. 10.10).

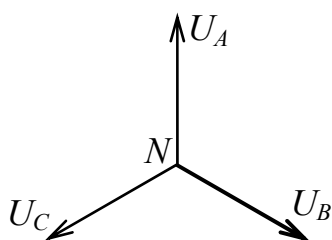


Рис. 10.10. Векторные диаграммы

Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора

$$K = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}}.$$

3. *Измерительные трансформаторы.* Для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов переменного тока используют измерительные трансформаторы. При этом измерительные трансформаторы изолируют приборы и, следовательно, обслуживающий персонал от цепи высокого напряжения.

В сердечниках измерительных трансформаторов используют электротехнические материалы с высокой магнитной проницаемостью с *прямоугольной узкой петлей гистерезиса*, как на рис. 10.11.

Это существенно снижает потери в сердечнике и увеличивает точность измерительных трансформаторов, и, следовательно, точность измерений. Измерительные трансформаторы подразделяют на трансформаторы напряжений (ТН) и на трансформаторы тока (ТТ).

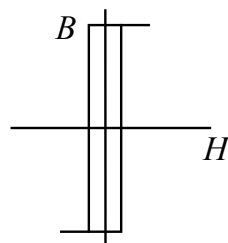


Рис. 10.11. Петля гистерезиса

Приборы, работающие с измерительными трансформаторами, градуируют непосредственно в единицах измеряемых первичных величин. При этом на шкале прибора указывают: «С транс.тока I_1/I_2 », или «С транс.напряжения U_1/U_2 ».

Измерительные трансформаторы классифицируют по точности, как и измерительные приборы, на классы 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 и т. д.

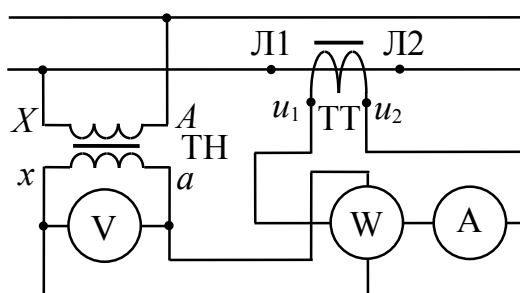


Рис. 10.12. Включение ТН и ТТ

Трансформатор тока нельзя включать с незамкнутой вторичной обмоткой, так как при этом во вторичной обмотке индуцируется высокое напряжение, опасное для человека, а трансформатор перегреется и «выйдет из строя».

4. *Автотрансформаторы.* В тех случаях, когда необходимо изменить напряжение переменного тока в небольших пределах (от 10 до 50 %), вместо двухобмоточных трансформаторов с изолированными друг от друга вторичной и первичной обмотками, используют автотрансформаторы.

Автотрансформатор – это одна обмотка, намотанная изолированным проводом на ферромагнитный сердечник, часто *кольцевого* вида, у которой кроме начального и конечного выводов имеются отводы для «снятия» (вывода) выходного напряжения. В автотрансформаторах протекают приблизительно такие же магнитоэлектрические процессы, как и в двухобмоточном трансформаторе. На рис. 10.13 приведены схемы автотрансформатора с одним вторичным отводом. Выходное напряжение у него $U_2 = \frac{W_2}{W_1} U_1$.

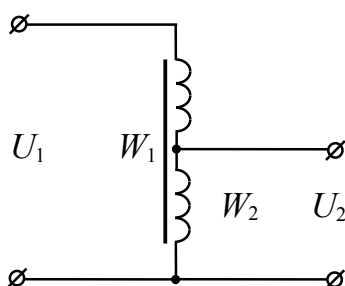


Рис. 10.13. Автотрансформатор с отводом

У маломощных автотрансформаторов часто обмотку наматывают на сердечник цилиндрической формы и с одного торца очищают провода от изоляции в виде дорожки, по которой скользит щетка-контакт для «снятия» выходного напряжения, как показано на рис. 10.14. Как видно из рис. 10.14, выходное напряжение U_2 можно изменять от $U_2 = 0$, когда $W_2 = 0$ и $U_2 = U_1$, когда $W_2 = W_1$, так как $U_2 = \frac{W_2}{W_1} U_1$, а W_2 изменяется от $W_2 = 0$ до $W_2 = W_1 = \text{const.}$

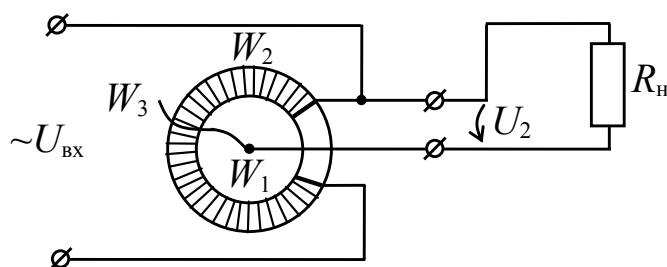


Рис. 10.14. Автотрансформатор с переменным K12

Вопросы

10.1. Общие сведения

1. Что такое трансформатор?
2. Назначение трансформатора.
3. Применение трансформаторов.
4. Классификация трансформаторов.

10.2. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора

1. Основные части трансформатора.
2. Назначение каждой части.
3. Схема электрической цепи с источником, двухобмоточным трансформатором и приемником.
4. Принцип действия трансформатора.
5. Коэффициент трансформации.
6. Магнитное состояние реального трансформатора.

10.3. Внешние характеристики и КПД трансформатора

1. Схема замещения двухобмоточного трансформатора.
2. Схема замещения вторичной цепи трансформатора.
3. Внешние характеристики вторичной цепи трансформатора для активного, индуктивного и емкостного приемников ($U_2 = f(I_2)$).
4. КПД реального трансформатора.

10.4. Типы трансформаторов

1. Многообмоточные трансформаторы.
 - 1.1. Схема замещения цепи с этим трансформатором.
 - 1.2. Чему равны напряжения на приемниках?
 - 1.3. Уравнение магнитного состояния.
2. Трехфазные трансформаторы.
 - 2.1. Назначение.
 - 2.2. Схема устройства трехфазного трансформатора.
 - 2.3. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора.
 - 2.4. Векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C .
 - 2.5. Коэффициент трансформации трехфазного трансформатора.
3. Измерительные трансформаторы.
 - 3.1. Назначение.
 - 3.2. Специфичность сердечника.
 - 3.3. Коэффициент трансформации ТН $K_u = \frac{w_2}{w_1}$.

- 3.4. Коэффициент трансформации ТТ $K_i = \frac{w_2}{w_1}$.
- 3.5. Схема включения измерительных трансформаторов.
- 4. Автотрансформаторы.
 - 4.1. Назначение автотрансформатора.
 - 4.2. Устройство автотрансформатора.
 - 4.3. Схема замещения автотрансформатора.
 - 4.4. Пределы изменения коэффициента трансформации.

ГЛАВА 11 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

11.1. Общие сведения

Электрические машины, в том числе и машины постоянного тока, являются преобразователями механической энергии в электрическую энергию – это генераторы постоянного тока (ГПТ). Но есть и электрические машины, в том числе постоянного тока, которые преобразуют электрическую энергию в механическую – это двигатели постоянного тока (ДПТ).

В настоящее время преимущественное распространение получила электрическая энергия переменного тока. Особенно трехфазная. Тем не менее, и до сих пор широко распространены машины постоянного тока – и ГПТ, и ДПТ. Например, в качестве *достоинств двигателей* постоянного тока можно указать: а) ДПТ обеспечивает *плавное регулирование* скорости вращения в широких пределах; б) создает *большой момент* при пуске двигателя. Машины постоянного тока (МПТ) используют: а) в качестве *тяговых двигателей* на электро-транспорте; б) в системах автоматического управления (САУ) ГПТ используются как датчики скорости вращения вала – тахогенераторы, двигатели (ДПТ) – как исполнительные элементы; в) ГПТ используют для питания электролитических ванн, для высококачественной сварки, для зарядки аккумуляторов; г) в автомобильном, судовом, самолетном оборудовании.

Поэтому МПТ выпускают в различном исполнении для различного применения:

а) системы генератор–двигатель (Г–Д) для прокатных станов мощностью $P = 6000$ кВт;

б) для систем автоматики мощностью доли Вт;

в) для радиотехники – МПТ высокого напряжения – до 30 кВ (для радиотехнических установок);

г) ГПТ низкого напряжения: $U = 20\text{--}60$ В – сварочные генераторы; $U = 6\text{--}123$ В, I до 10000 А, ГПТ для электролиза.

Коэффициент полезного действия (КПД) η машин постоянного тока зависит от мощности используемой МПТ. Например, при $P = 100$ Вт $\eta = 62\%$, при $P = 100$ кВт $\eta = 91\%$.

Основным недостатком МПТ является *щеточно-коллекторный* контактный узел, который существенно снижает надежность работы МПТ. Во время работы щетки и коллекторные пластины, по которым

скользят щетки, могут искрить, подгорать, ухудшая надежность электрического контакта. Кроме этого, щеточно-коллекторный узел удорожает машину постоянного тока. А для питания ДПТ требуются источники питания постоянного тока, либо ГПТ, либо выпрямители переменного тока.

11.2. Устройство машины постоянного тока

На рис. 11.1 приведена схема поперечного разреза МПТ для ознакомления с ее конструкцией и принципом действия.

Основные части машины:

- а) статор с магнитными полюсами;
- б) ротор с обмоткой (его называют якорем);
- в) щеточно-коллекторное устройство.

Статор. Он является механическим остовом МПТ и одновременно служит для создания основного *неподвижного магнитного поля*. Статор выполняется в виде цилиндрической стальной станины (литой или сварной). Внутри статора укрепляются полюсы машины из мягкой ковanej стали или набранных из тонких стальных пластин. Форма полюсных наконечников такая, чтобы распределение магнитной индукции под каждым полюсом было близким к трапецеидальному. *На полюсах* возбуждения укрепляют катушки и соединяют их так, чтобы полюсы *N–S чередовались*. Такие катушки образуют обмотку возбуждения.

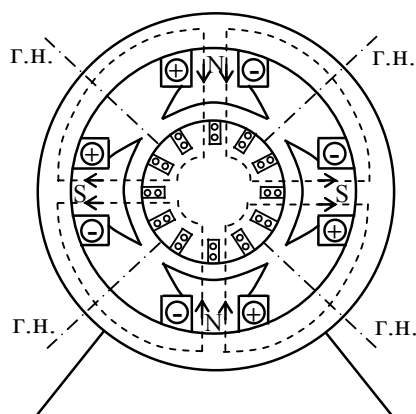


Рис. 11.1. МПТ

В машине индукция магнитного поля *нормальна к поверхности* якоря. Под полюсами индукция наибольшая, в середине между полюсами она равна нулю. Линии через середины полюсов и центр якоря –

продольные магнитные оси. Линии, проходящие в середине между смежными полюсами, называются *геометрическими нейтралями* (г.н. – поперечные магнитные оси). Часть окружности между нейтралями называется полюсным делением τ .

Якорь. *Стальной цилиндр, собранный из дисков, штампованных из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Диски изолированы друг от друга лаком, чтобы уменьшить потери от вихревых магнитных потоков. В пазы якоря укладываются провода обмоток якоря, соединяемые друг с другом по определенной схеме. Для увеличения ЭДС обмотки в каждую пару пазов якоря укладывают не один, а несколько витков. Все катушки имеют одинаковую форму и одной стороной помещаются вверху одного паза, а другой – внизу другого паза (двухслойная обмотка). В пазах обмотку закрепляют клиньями, лобовые части стягивают бандажами. Каждая катушка укладывается в пазы под смежные полюсы на расстоянии полюсного деления. Концы катушки подсоединяют к двум коллекторным пластинам (рис. 11.2). Секции подключают к коллектору по петлевой или волновой схемам таким образом, чтобы ЭДС каждой секции суммировалась с ЭДС других секций.*

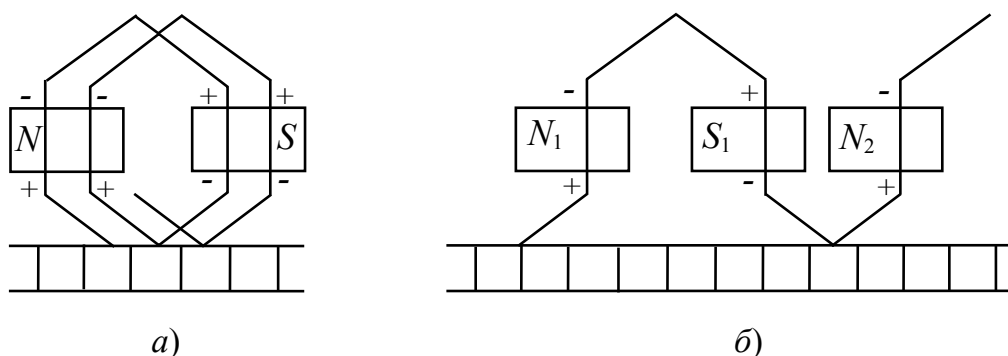


Рис. 11.2. Обмотки якоря:
а – петлевая; б – волновая

Щеточно-коллекторный узел. Коллектор, к которому присоединяется обмотка якоря, состоит из отдельных медных пластин, изолированных друг от друга и от вала *прокладками из миканита*. Коллектор у *генераторов* предназначен для *выпрямления* переменного тока якоря в постоянный для внешней цепи, у *двигателей* – для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря при его вращении. По коллектору скользят щетки, закрепляемые в специальных щеткодержателях. Щетки медно-графитовые или бронзографитовые. К щеткам подсоединяются внешние цепи.

11.3. Режимы работы машин постоянного тока

Рассмотрим упрощенную схему двухполюсной машины постоянного тока (рис. 11.3).

Постоянное магнитное поле полюсов создает электрический ток возбуждения I_B , протекающий в обмотке статора.

Магнитный поток Φ пронизывает витки обмотки якоря. Концы каждой петли обмотки якоря припаяны к пластинам коллектора, изолированным друг от друга и от вала. По пластинам коллектора скользят контактные щетки, соединяющие каждую петлю обмотки якоря с внешней цепью в определенный момент времени.

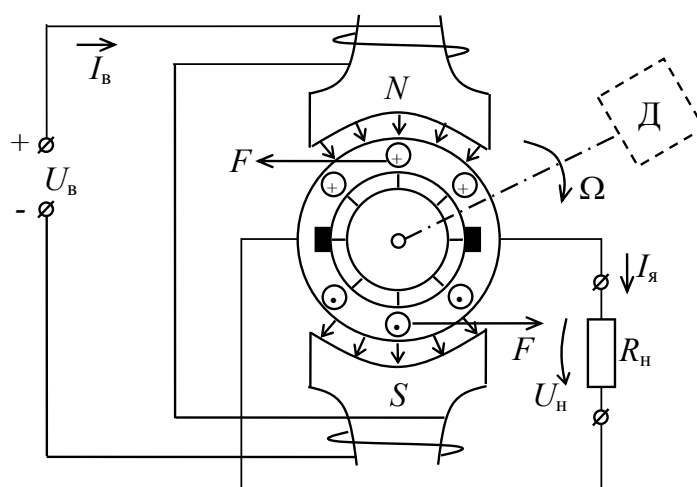


Рис. 11.3. Схема двухполюсной МПТ

Режим генератора. Якорь вращается от постороннего двигателя Д. Витки (проводники) обмотки якоря пересекают при вращении якоря магнитный поток Φ между полюсами и в обмотке якоря наводится ЭДС

$$E_{\text{я}} = c_E \Omega \Phi, \quad (11.1)$$

где Ω – скорость вращения якоря; Φ – магнитный поток между полюсами; c_E – конструктивная постоянная машины.

При подключении к обмотке якоря (к щеткам) приемника электрической энергии R_H (нагрузка) по замкнутой цепи через R_H и обмотку якоря потечет ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}}}{R_H + r_{\text{я}}}, \quad (11.2)$$

где $r_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря.

Ток якоря $I_{\text{я}}$, взаимодействуя с магнитным потоком Φ , создает электромагнитный момент якоря

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi, \quad (11.3)$$

где c_M – конструктивная постоянная.

Этот момент в генераторе является *противодействующим* моментом (тормозным). Следовательно, чтобы МПТ работала в качестве генератора, необходимо, чтобы *посторонний (первичный) двигатель*, вращающий якорь генератора, смог *преодолеть* этот противодействующий момент.

Пренебрегая потерями *на трение*, механическую мощность первичного двигателя можно приравнять к *тормозной* электромагнитной мощности генератора

$$P_{\text{мех}} = M \Omega = P_{\text{эм}}. \quad (11.4)$$

Для замкнутой цепи обмотки якоря по второму закону Кирхгофа можно записать

$$E_{\text{я}} = U_{\text{н}} + I_{\text{я}} r_{\text{я}}, \quad (11.5)$$

где $U_{\text{н}} = I_{\text{я}} R_{\text{н}}$.

Тогда

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}} = U_{\text{н}} I_{\text{я}} + r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 = P_{\text{мех}}, \quad (11.6)$$

где $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} = P_{\text{н}} + P_{\text{потерь}}$, $P_{\text{н}}$ – мощность в нагрузке $R_{\text{н}}$; $P_{\text{потерь}}$ – мощность потерь в якоре.

Таким образом, мощность первичного двигателя $P_{\text{мех}}$ должна быть *не меньше мощности*, потребляемой нагрузкой $R_{\text{н}}$, плюс потери мощности в генераторе, $P_{\text{потерь}}$.

Режим двигателя. Возьмем МПТ на рис. 11.3, отсоединим от нее посторонний двигатель и отключим электрическую нагрузку $R_{\text{н}}$. Вместо этой нагрузки $R_{\text{н}}$ подключим к зажимам обмотки якоря постоянное напряжение U от *постороннего источника*. По обмотке якоря потечет ток якоря $I_{\text{я}}$. Магнитный поток Φ , создаваемый током возбуждения $I_{\text{в}}$ в обмотке статора, *пронизывает обмотку* якоря и взаимодействует с током $I_{\text{я}}$. В результате такого взаимодействия возникает электромагнитный момент $M = c_M I_{\text{я}} \Phi$ (рис. 11.3), который начинает вращать якорь, т. е. машина начинает работать в режиме двигателя.

Как видим, чтобы преодолеть сопротивление механической нагрузки на валу, электродвигатель должен потреблять электрическую энергию от внешнего источника. Таким образом, в двигателе происходит *преобразование электрической энергии в механическую*.

Следовательно, одна и та же МПТ может работать и как генератор, и как двигатель, т. е. обладает свойством обратимости (рис. 11.4).

В двигателе мощность из сети (мощность постороннего источника) $P_{\text{и}} = UI_{\text{я}}$ расходуется на создание $P_{\text{мех}}$ и на потери $I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$, т. е.

$$UI_{\text{я}} = P_{\text{мех}} + I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}. \quad (11.7)$$

Как в генераторе, так и в двигателе энергия источника тока возбуждения преобразуется в энергию магнитного потока Φ , которая, взаимодействуя с током якоря $I_{\text{я}}$, создает электромагнитный момент M , *тормозной в генераторе, вращающий в двигателе* и ЭДС якоря $E_{\text{я}}$.

11.4. Преобразование энергии и КПД МПТ

В предыдущем параграфе мы рассмотрели работу МПТ в режимах генератора и двигателя. И в каждом режиме работа машины сопровождается потерями энергии: электрическими, магнитными, и на нагрев машины. И чем больше потери энергии, тем меньше КПД машины.

Рассмотрим диаграммы мощностей генераторов и двигателей, отражающие потери энергии в процессе функционирования.

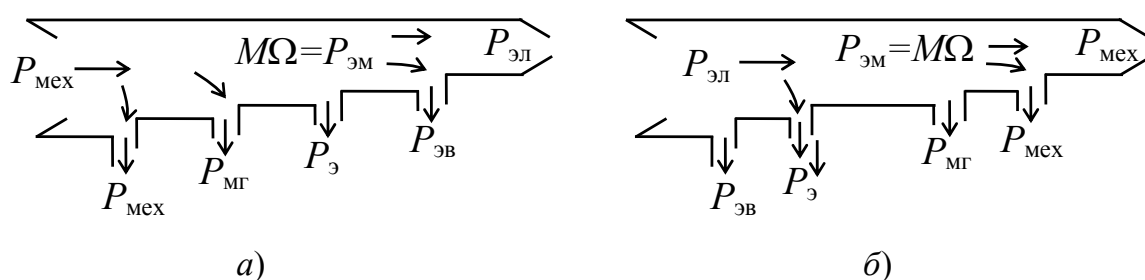


Рис. 11.4. Диаграммы мощностей МПТ:
а – режим генератора; б – режим двигателя

Потери – это непроизводительные преобразования энергии в процессе работы МПТ.

$P_{\text{мех}}$ – механические потери от трения в подшипниках и вентиляционные (1–2 % от $P_{\text{ном}}$);

$P_{\text{мг}}$ – магнитные потери в якоре при его перемагничивании во время вращения (1–3 % от $P_{\text{ном}}$);

$P_{\text{э.в}}$ – электрические потери в цепи возбуждения (0,5–7 % от $P_{\text{ном}}$);

$P_{\text{з}}$ – электрические потери (~50 % от всех потерь машины).

Следует отметить, что номинальный КПД машины зависит от номинальной *мощности* машины, т. е. КПД $\eta = f(P_{\text{н}})$ (рис. 11.5).

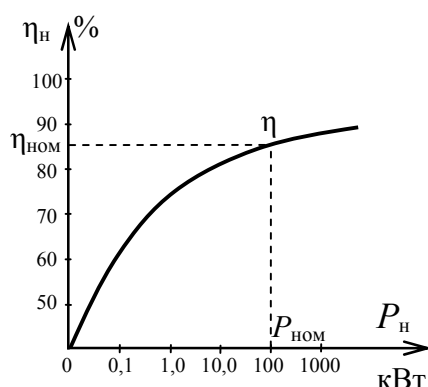


Рис. 11.5. $\eta = f(P_{\text{н}})$

В процессе работы η изменяется от 0 в режиме холостого хода до $\eta_{\text{н}}$ при $P_{\text{н}}$.

Для улучшения КПД применяют различные способы отвода тепла.

КПД $\eta_{\text{генерат}} = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}}$; $\eta_{\text{двиг}} = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{эл}}}$ – из диаграмм на рис. 11.4.

11.5. Способы возбуждения машин постоянного тока

Применяют четыре способа возбуждения МПТ. Каждый из них имеет свои особенности и свои преимущественные применения.

1. *Независимое возбуждение.* В этом случае обмотка возбуждения питается от отдельного источника и обмотка якоря питается от своего отдельного источника (НОВ – независимая обмотка возбуждения).

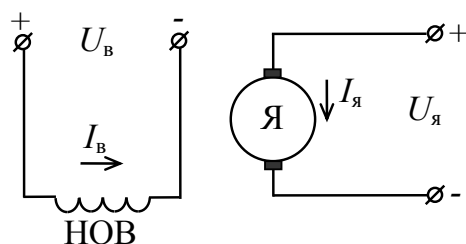


Рис. 11.6. Независимое возбуждение

2. *Параллельное возбуждение* (шунтовая МПТ). В этом случае и обмотка возбуждения, и обмотка якоря питаются от одного источника:

$$I_{\text{в.ном}} = (0,01-0,05) I_{\text{я.ном}} \text{ (ШОВ – шунтовая обмотка возбуждения).}$$

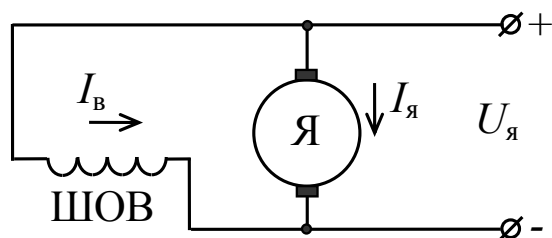


Рис. 11.7. Параллельное возбуждение

Здесь обмотку возбуждения выполняют с большим числом витков тонкого провода, чтобы $r_{\text{в}} = (100-20)r_{\text{я}}$.

3. *Последовательное возбуждение* (сериесная МПТ).

$$I_{\text{в.ном}} = I_{\text{я.ном}}.$$

Здесь обмотку возбуждения выполняют с малым числом витков толстым проводом (СОВ – сериесная обмотка возбуждения).

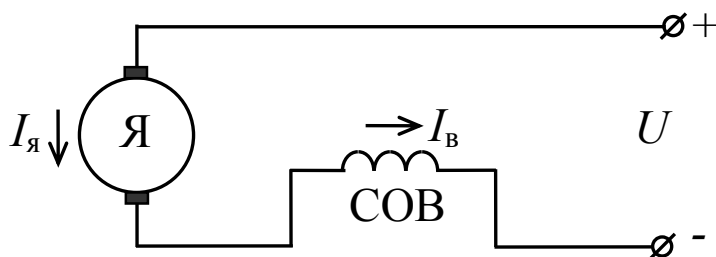


Рис. 11.8. Последовательное возбуждение

4. *Смешанное соединение* (компаундные МПТ).

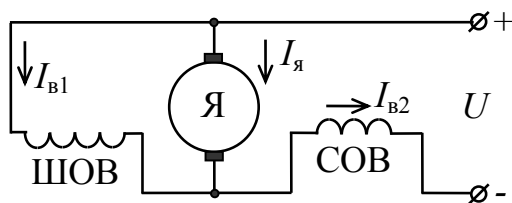


Рис. 11.9. Смешанное возбуждение

ШОВ выполняют как в п. 2, а СОВ – как в п. 3.

11.6. Генератор независимого возбуждения

Помним, что назначение генератора – преобразовывать *механическую* энергию первичного (постороннего) двигателя, который вращает якорь генератора в постоянном магнитном поле с потоком Φ , преодолевая тормозной момент якоря $M = c_M I_{\text{я}} \Phi$. При этом в обмотке якоря индуцируется ЭДС $E_{\text{я}} = c_E \Omega \Phi$, где Φ создается током $I_{\text{в}}$ в независимой обмотке возбуждения, как показано на рис. 11.10. При постоянной скорости вращения якоря Ω ЭДС якоря $E_{\text{я}}$ зависит от величины $I_{\text{в}}$, а полярность $E_{\text{я}}$ зависит от направления тока возбуждения $I_{\text{в}}$. Перемещая движок потенциометра $R_{\text{в}}$ (вверх или вниз от середины), можно изменять величину и полярность $E_{\text{я}}$, т. е. $U_{\text{н}}$, так как $E_{\text{я}} = U_{\text{н}} + I_{\text{я}} r_{\text{я}}$ ($I_{\text{я}} = I_{\text{н}}$).

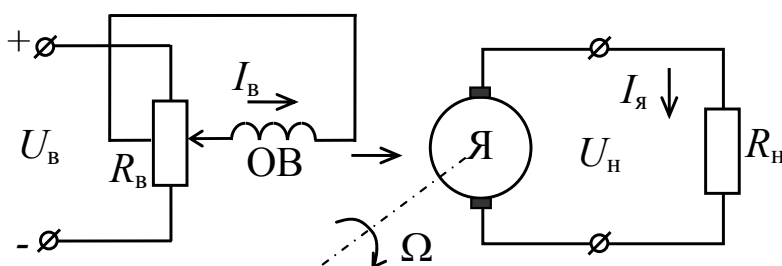


Рис. 11.10. Генератор независимого возбуждения

В качестве $R_{\text{н}}$ можно подключать двигатель постоянного тока ДПТ. В этом случае получится *реверсивная система Г–Д* (генератор–двигатель). Такие системы используют в реверсивных приводах, например, в мощных приводах реверсивных толстолистовых станов горячей прокатки, где требуются быстрый реверс и изменение скорости.

Как и у любого генератора, основной характеристикой генератора с независимым возбуждением является внешняя характеристика $U_{\text{н}} = f(I_{\text{я}})$ при $I_{\text{в}} = \text{const}$. Кроме внешней характеристики используют характеристику холостого хода (XXX) $U_{\text{н0}} = E = f(I_{\text{в}})$ при $\Omega = \text{const}$ и вспомогательную (регулировочную) характеристику $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$ при $U_{\text{н}} = \text{const}$.

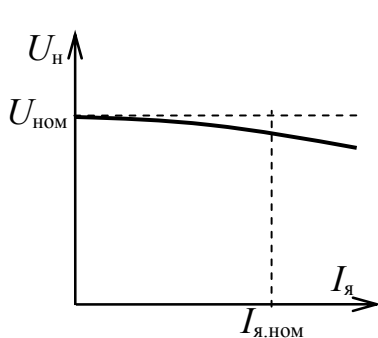


Рис. 11.11. Внешняя характеристика

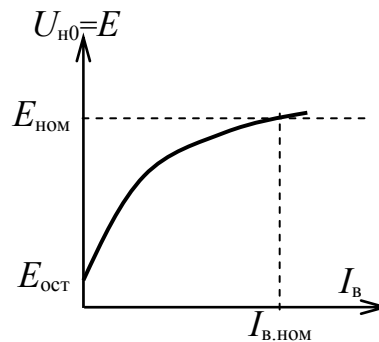


Рис. 11.12. Характеристика холостого хода

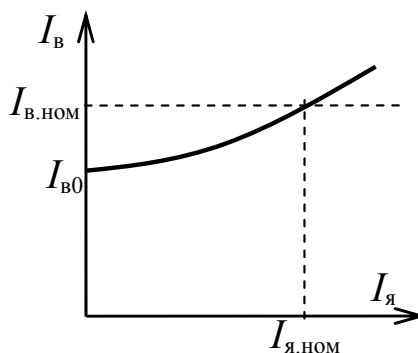


Рис. 11.13. Регулировочная характеристика

Внешняя характеристика показывает, что при увеличении тока $I_{\text{я}}$ напряжение на нагрузке уменьшается $U_{\text{H}} = U_{\text{я}} - I_{\text{я}} r_{\text{я}}$. Путем увеличения I_{B} , как показано на регулировочной характеристике, это уменьшение U_{H} можно скомпенсировать.

Характеристика холостого хода генератора показывает зависимость ЭДС E при неподключенной нагрузке R_{H} и постоянной скорости вращения якоря. Регулировочная характеристика показывает, как при $U_{\text{H}} = \text{const}$ поддерживать ток $I_{\text{я.НОМ}}$ путем изменения I_{B} при изменениях нагрузки генератора R_{H} .

Недостатком МПТ независимого возбуждения считается *необходимость* во вспомогательном источнике возбуждения.

При коротком замыкании ток $I_{\text{я.кз}}$ в 15–20 раз превышает номинальный $I_{\text{я.НОМ}}$. Поэтому должна быть установлена защита от короткого замыкания.

11.7. Генератор параллельного возбуждения

В отличие от генератора независимого возбуждения, этому генератору не требуется отдельный источник возбуждения. Генератор параллельного возбуждения – это самовозбуждающийся генератор. Схема такого генератора приведена на рис. 11.14.

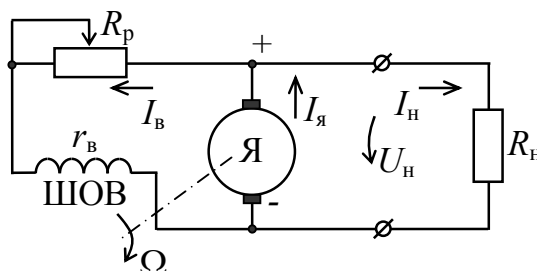


Рис. 11.14. Генератор параллельного возбуждения

Рассмотрим сначала условие самовозбуждения генератора. Генератор сначала включаем в режиме холостого хода (R_H еще не подключено к генератору), т. е. $I_H = 0$. В этом случае $I_я = I_B$, а якорь вращается со скоростью $\Omega = \Omega_{ном}$ (от отдельного двигателя).

Для того чтобы генератор самовозбудился, надо, чтобы были выполнены следующие условия:

1. В сердечнике обмотки возбуждения ОВ должна быть остаточная намагниченность, т. е. $\Phi_{ост}$, пусть хотя бы небольшая.

2. Необходимо, чтобы направление остаточного $\Phi_{ост}$ совпадало с направлением требуемого потока возбуждения Φ_B .

3. Сопротивление цепи возбуждения при отключенной нагрузке R_H будет $R_B = r_я + r_B$, где $r_я$ – сопротивление обмотки якоря, r_B – сопротивление обмотки возбуждения, при выведенном регулировочном реостате $R_p = 0$. Оно должно быть меньше некоторого критического значения $R_{кр}$, т. е. должно выполняться условие

$$R_B = r_я + r_B < R_{кр}.$$

Только при выполнении этих трех условий при раскрутке якоря генератора до номинальной скорости Ω первичным двигателем может произойти последовательное намагничивание сердечника обмотки возбуждения ШОВ и достичь номинального магнитного потока $\Phi_{ном}$.

При этом намагничивание генератора происходит по замкнутому кругу при отключенной нагрузке R_H (см. рис. 11.14):

$$E_1 = c_E \Omega \Phi_{\text{ост}} \rightarrow I_1 = \frac{E_1}{R_B} \rightarrow \Phi_1 = \Phi_{\text{ост}} + \Delta \Phi \rightarrow E_2 = c_E \Omega \Phi_1 \rightarrow \\ \rightarrow I_2 = \frac{E_2}{R_B} \rightarrow \Phi_2 \rightarrow E_3 = c_E \Omega \Phi_2 \rightarrow \text{и т. д.} \rightarrow \text{до } E_{\text{ном}} = c_E \Omega \Phi_{\text{ном}}.$$

Нагрузку R_H к генератору подключают после окончания процесса самовозбуждения (*через несколько секунд*).

В режиме нагрузки генератор характеризуется внешней характеристикой $U_H = f(I_H)$ при $R_B = \text{const}$ и $\Omega = \Omega_H = \text{const}$. На рис. 11.15 приведена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением и генератора с последовательным возбуждением. Внешняя характеристика 2 (генератор с самовозбуждением) отличается от внешней характеристики 1 (генератор с независимым возбуждением) более крутым спадом напряжения U_H при увеличении тока нагрузки I_H потому, что при увеличении I_H напряжение $U_H = E_{\text{я}} - I_H r_{\text{я}}$ уменьшается, что влечет уменьшение тока возбуждения I_B , а это значит уменьшение $E_{\text{я}}$ и, следовательно, U_H . При номинальной нагрузке U_H меньше $E_{\text{я}0}$ на 10–18 %.

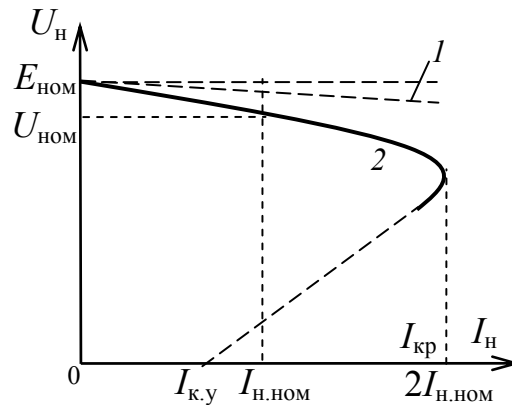


Рис. 11.15. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

Как видно из внешней характеристики, при дальнейшем повышении тока I_H напряжение U_H начинает уменьшаться все быстрее, и при достижении тока I_H значения критического $I_{\text{кр}}$ ток I_H начинает самопроизвольно уменьшаться. При этом U_H тоже уменьшается до

нуля в результате резкого размагничивания магнитной системы генератора. При этом ток $I_{\text{я}}$ уменьшается до установившегося значения $I_{\text{к.у}}$ – ток короткого замыкания при размагничивании. Обычно $I_{\text{к.у}} < I_{\text{ном}}$. Но при резком внезапном КЗ кратковременно может быть $I_{\text{кз}} = (20\text{--}30)I_{\text{к.у}}$. Поэтому и здесь необходима защита от токов КЗ.

11.8. Генератор смешанного возбуждения

В этом генераторе используют две обмотки возбуждения. Основная обмотка возбуждения – параллельная (шунтовая) ШОВ и вспомогательная – последовательная (серийная) СОВ обмотка. Схема генератора приведена на рис. 11.16.

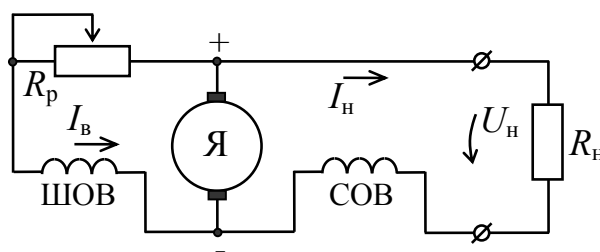


Рис. 11.16. Генератор со смешанным возбуждением

Шунтовая обмотка ШОВ включается параллельно якору. По ней протекает небольшой ток $I_{\text{в.ш}} = (0,01\text{--}0,03)I_{\text{н}}$. Но эта обмотка имеет большое число витков тонкого провода. Поэтому, благодаря большому числу витков, даже при малом токе эта обмотка создает *основной магнитный поток* $\Phi_{\text{ш}}$. Шунтовая обмотка позволяет генератору самовозбуждаться при разомкнутой цепи нагрузки.

Серийная обмотка СОВ рассчитана на ток нагрузки $I_{\text{н}}$, имеет малое число витков толстого провода. При подключении нагрузки $R_{\text{н}}$ по серийной обмотке потечет ток $I_{\text{н}}$ и в серийной обмотке возникает *дополнительный магнитный поток* $\Phi_{\text{с}} = f(I_{\text{н}})$.

Если включить оба потока согласно, то суммарный поток $\Phi = \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}}$ будет поддерживать напряжение $U_{\text{н}}$ приблизительно постоянным при больших изменениях тока $I_{\text{н}}$ (характеристика I на рис. 11.17). А более точную дополнительную установку напряжения $U_{\text{н}}$ можно осуществлять при помощи изменения сопротивления регулировочного реостата $R_{\text{р}}$ в цепи шунтовой обмотки.

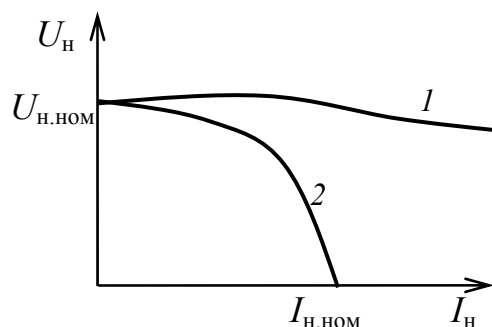


Рис. 11.17. Внешняя характеристика генератора

Если же включить оба потока *встречно*, то суммарный поток $\Phi = \Phi_{\text{ш}} - \Phi_{\text{с}}$. Тогда внешняя характеристика будет крутопадающей (характеристика 2 на рис. 11.17). Например, такие характеристики нужны для сварочных аппаратов.

11.9. Двигатели постоянного тока

Как было указано в § 11.3, машина постоянного тока МПТ может работать в режиме генератора, когда энергия отдельного (постоянного) двигателя, или паровая турбина, или гидротурбина, вращает якорь генератора, витки обмотки которой пересекают магнитное поле статора и в обмотке индуцируется ЭДС генератора в якоре. При подключении $R_{\text{н}}$ потечет ток $I_{\text{н}}$, он же ток якоря $I_{\text{я}}$, который создает тормозной момент $M_{\text{я}} = C_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi$. Этот момент преодолевается моментом на валу турбины или постороннего двигателя. Это показано на рис. 11.3.

Превратим эту МПТ-генератор в МПТ-двигатель, чтобы показать обратимые возможности МПТ (см. рис. 11.3).

1. Отсоединим вал МПТ от вала постороннего двигателя или турбины.

2. Отключим от обмотки якоря нагрузку $R_{\text{н}}$.

3. Вместо нагрузки $R_{\text{н}}$ к обмотке якоря подключим постоянное напряжение $U_{\text{я}}$ от постороннего источника.

4. По обмотке якоря потечет ток якоря $I_{\text{я}}$.

5. Этот ток якоря $I_{\text{я}}$ взаимодействует с магнитным полем статора и создает вращающий момент двигателя $M = C_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi$ (см. (11.3)).

Теперь схема двухполюсного двигателя постоянного тока будет как на рис. 11.18.

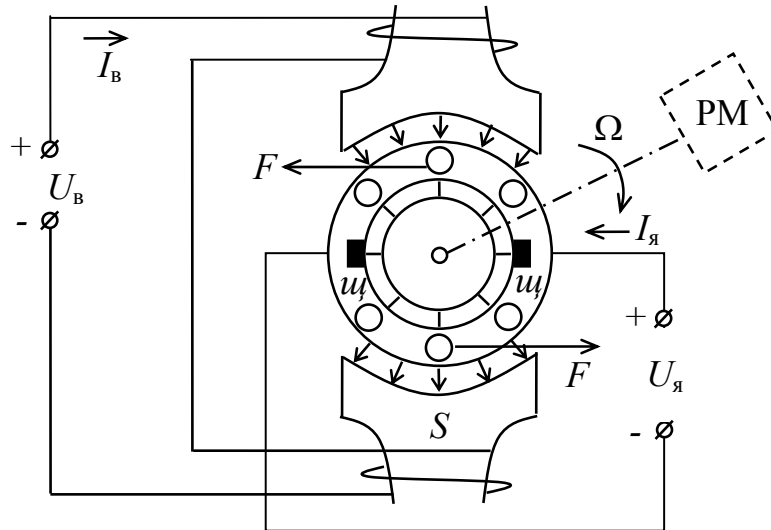


Рис. 11.18. Двухполюсная МПТ в режиме двигателя

Ток $I_{я}$ в обмотке якоря протекает через коллекторные пластины и поэтому под каждым магнитным полюсом не меняет своего направления, а это значит, сила F и момент M не меняет своего направления. Поэтому якорь двигателя вращается в одну сторону, например, по часовой стрелке, как указано на рис. 11.18, и вращает рабочий механизм РМ.

При вращении якоря витки обмотки якоря пересекают магнитно-силовые линии постоянного магнитного поля статора, и в обмотке якоря индуцируется ЭДС $E_{я} = C_E \Phi \Omega$. Эта ЭДС $E_{я}$ направлена противоположно току якоря $I_{я}$. Поэтому эту ЭДС $E_{я}$ называют противоЭДС, так как она уменьшает ток якоря

$$I_{я} = \frac{U_{я} - E_{я}}{r_{я}}. \quad (11.8)$$

11.10. Двигатели параллельного и независимого возбуждения

На рис. 11.19 приведена схема замещения двигателя постоянного тока ДПТ с параллельным возбуждением.

Как видно из схемы, шунтовая обмотка возбуждения ШОВ питается от напряжения U через регулировочный реостат R_p параллельно обмотке якоря. Обмотка якоря питается через пусковой реостат $R_{п}$.

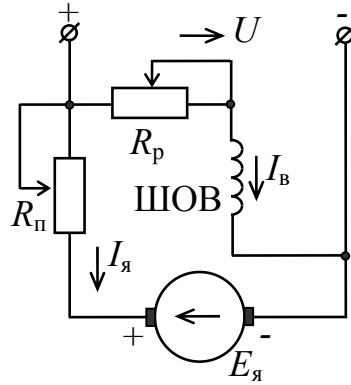


Рис. 11.19. ДПТ параллельного возбуждения

Пуск. Во время пуска $R_{\text{п}}$ устанавливают в максимальное положение ($R_{\text{п}} = R_{\text{max}}$), а при помощи регулировочного реостата R_{p} устанавливают магнитный поток $\Phi = \Phi_{\text{max}}$. После разгона двигателя пусковой реостат выводят из цепи, т. е. устанавливают $R_{\text{п}} = 0$, а R_{p} устанавливают в такое положение, при котором $M = M_{\text{н}}$.

Однако следует отметить, что сопротивление обмотки якоря $r_{\text{я}}$ мало, и поэтому в номинальном режиме потери напряжения в обмотке якоря $\Delta U = U_{\text{ном}} - E_{\text{ном}} = r_{\text{я}} I_{\text{ном}} = (0,03-0,07)U_{\text{ном}}$ — малы!

Поэтому U и $E_{\text{я}}$ незначительно отличаются друг от друга.

Однако для пуска двигателя необходимо, чтобы $M_{\text{п}} > M_{\text{н}}$. Действительно, в момент пуска $E_{\text{я}} = 0$ и $M_{\text{п}} \gg C_M \Phi \frac{U}{r_{\text{я}}} \gg M_{\text{н}}$, так как

ток якоря $I_{\text{я.п}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$ в 10–20 раз больше $I_{\text{я.ном}}$.

Этот толчок тока опасен для коллектора и для сети. Слишком большой $M_{\text{п}}$ (толчок $M_{\text{п}}$) действует на передачу и рабочие механизмы. Поэтому при пуске необходимо снижать $I_{\text{я.п}}$. Из формулы видно, что снизить $I_{\text{я.п}}$ можно двумя путями:

1. Включать в цепь якоря пусковой реостат. Тогда ток $I_{\text{я.п}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$ (при $U = \text{const}$). После раскрутки якоря $R_{\text{п}}$ выводят, т. е. $R_{\text{п}} = 0$.

2. Запускать двигатель при пониженном напряжении U (в системах Г–Д).

Обычно допустимый ток при пуске устанавливают $I_{я.п} = (2-2,5)I_{я.н}$. Отсюда $R_{п} = \frac{U}{(2-2,5)I_{я.н}} - r_{я}$. При разгоне двигателя Ω растет и $E_{я} = c_E \Phi \Omega$ увеличивается. Поэтому $I_{я} = \frac{U - E_{я}}{r_{я} + R_{п}}$ уменьшается. Следовательно, по мере возрастания Ω надо выводить $R_{п}$. При выходе на естественную механическую характеристику $R_{п}$ полностью выводят, т. е. $R_{п} = 0$.

Но и при ограниченном пусковом токе якоря $I_{я.п}$ стараются пусковой момент $M_{п}$ сделать больше, чтобы быстрее запустить двигатель. Для этого при пуске регулировочным реостатом R_p увеличивают ток $I_{в}$, тем самым увеличивая магнитный поток Φ до максимальной величины $\Phi = \Phi_{\max}$. В результате увеличивается $M_{п} = c_M I_{я.п} \Phi_{\max}$.

Следует отметить, что электродвигатели обладают свойством саморегулирования. Они всегда развивают момент $M_{д}$, равный моменту сопротивления нагрузки на валу двигателя. Это можно увидеть на основе следующих рассуждений. Нам известны уравнения:

$$E_{я} = c_E \Phi \Omega, \quad I_{я} = \frac{U - E_{я}}{r_{я}}, \quad M = c_M \Phi I_{я}.$$

Пусть в данный момент времени момент двигателя M равен моменту сопротивления нагрузки на валу M_c , т. е. $M = M_c$.

При увеличении $M_c \uparrow$ скорость вращения $\Omega \downarrow$ будет уменьшаться, что приведет к уменьшению ЭДС якоря $E_{я} \downarrow$. Но в этом случае ток якоря будет увеличиваться $I_{я} \uparrow$. А увеличение $I_{я}$ приведет к увеличению момента двигателя до $M \approx M_c$, т. е. электродвигатель автоматически приспособливается к нагрузке.

Роль «саморегулятора» выполняет противоЭДС якоря $E_{я}$.

На рис. 11.20 приведена схема замещения ДПТ с независимым возбуждением.

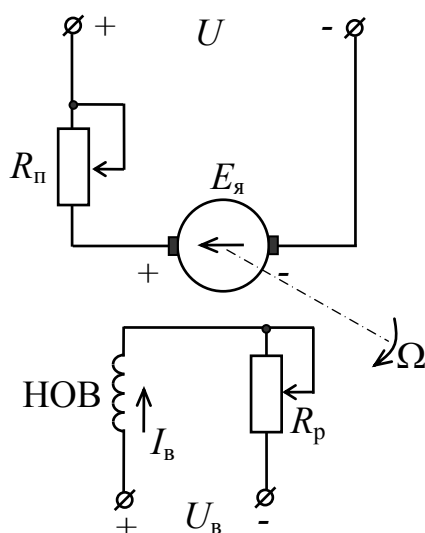


Рис. 11.20. ДПТ независимого возбуждения

Механическая характеристика ДПТ $\Omega = f(M)$ определяется уравнением

$$\Omega = \Omega_0 \left(1 - \frac{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}{U C_M \Phi} M \right), \quad (11.9)$$

где $\Omega_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$ – скорость идеального ХХ (холостого хода) при $M = 0$,

где C_M – конструктивная постоянная.

Это уравнение прямой. Так как сопротивление обмотки якоря $r_{\text{я}}$ мало, то при отключенном пусковом реостате $R_{\text{п}} = 0$ изменения момента M мало влияют на изменения Ω . Эта характеристика «жесткая» – (отклонение 3–7 % от Ω_0).

Если же в цепь якоря включить $R_{\text{п}}$, то характеристика становится «мягкой».

На рис. 11.21 приведены механические характеристики для различных значений сопротивления пускового реостата $R_{\text{п}}$. Сопротивлению $R_{\text{п}} = 0$ соответствует первая характеристика 1. Полностью введенному в цепь $R_{\text{п}}$ соответствует характеристика 4.

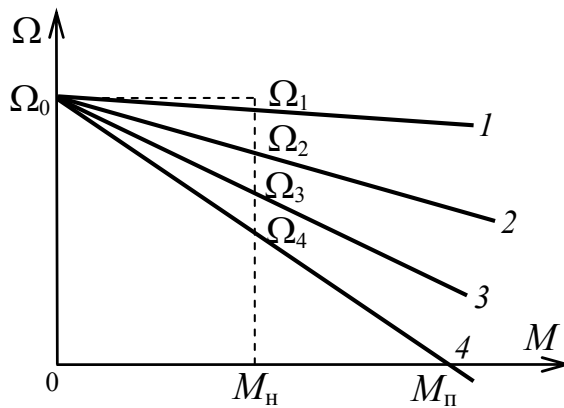


Рис. 11.21. Механическая характеристика ДПТ на рис. 11.19 и 11.20

Рассмотрим способы регулирования скорости в этих двигателях.

Известно $\Omega = \frac{E_{\text{я}}}{c_E \Phi} = \frac{U - r_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c_E \Phi}$.

Из формулы видно, что Ω можно изменить путем изменения $I_{\text{я}}$, U , Φ :

1) реостатное регулирование путем изменения $I_{\text{я}}$. В цепи якоря $R_{\text{п}}$ рассчитывают на длительную работу. Чем больше $R_{\text{п}}$, тем меньше скорость. Однако такое регулирование неэкономно из-за потерь $P_{R_{\text{п}}} = R_{\text{п}} I_{\text{я}}^2$. Используется для двигателей малой мощности;

2) регулирование изменением потока Φ (полюсное регулирование), так как $\Omega_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$. Это значит, что при $U = \text{const}$ $\Omega_0 = f(I_{\text{в}})$.

Однако при $I_{\text{в}} \rightarrow 0$ $\Omega_0 \rightarrow \infty$, т. е. двигатель «идет вразнос». Могут быть механические повреждения якоря, сильное искрение щеток. Поэтому нельзя уменьшать $I_{\text{в}}$ до малых значений;

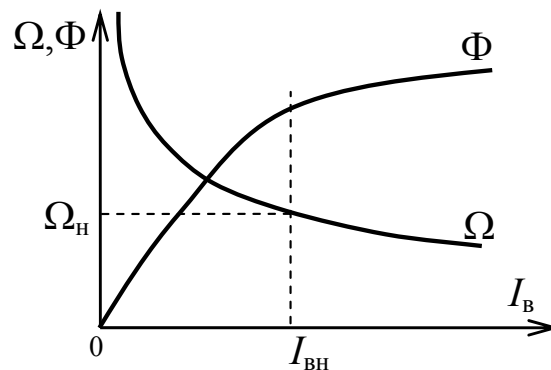


Рис. 11.22. Регулирование скорости ДПТ

3) регулирование скорости изменением U (якорное регулирование). Обычно используется в двигателях независимого возбуждения (в системах Г–Д или при тиристорном управлении – управляемые выпрямители). В любом случае здесь нужен источник с регулируемым напряжением.

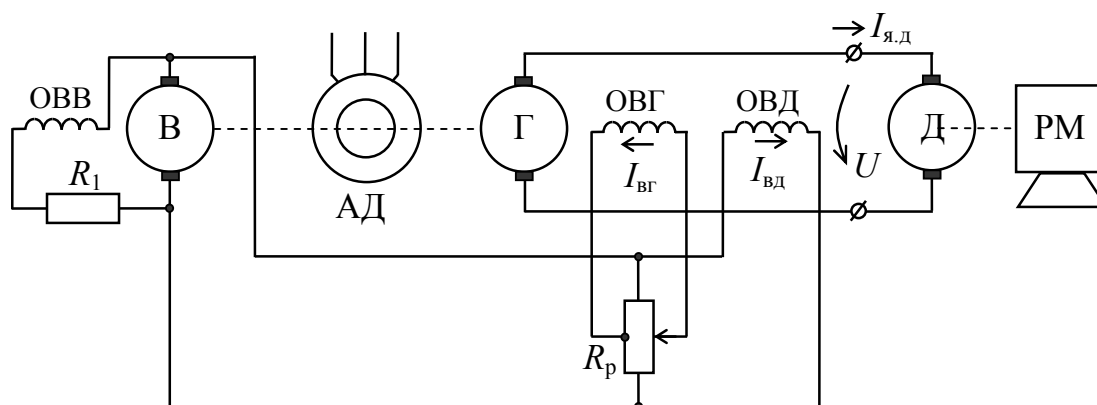


Рис. 11.23. Система Г–Д

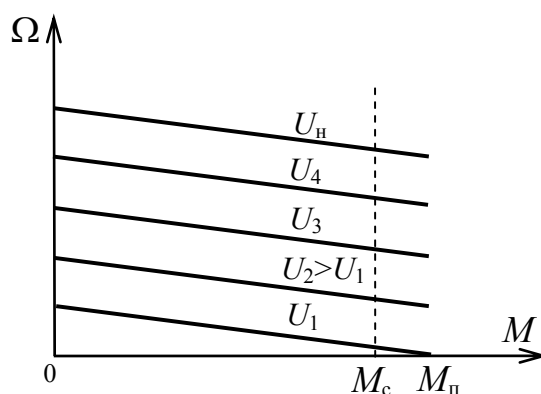


Рис. 11.24. Регулирование изменением напряжения U

Схема регулирования сложная, но часто применяемая и ныне для привода мощных двигателей (например, прокатных станов). Реверс – смена направления $I_{в.г}$.

Торможение

1) противовключением. Меняют полярность напряжения якоря двигателя U . Тогда $I_{я.д}$ меняет направление и $I_{я.д}r_я = U + E$. При этом момент на валу меняет направление вращения $M_{вр} = c_M \Phi I_{я.д}$. Чтобы уменьшить $I_{я.д}$, включают в цепь реостат;

2) генераторное динамическое торможение. Отключают якорь от сети и замыкают на реостат. Ток $I_{я}$ меняет направление

$$I_{я.д} = \frac{U - E}{r_{я}} = -\frac{E}{r_{я}}. \text{ Появляется } M_{\text{торм}} = c_M \Phi \left(-\frac{E}{r_{я}} \right) = -c_M \Phi \frac{E}{r_{я}};$$

3) рекуперативное торможение. При этом $\Omega > \Omega_0$, $E > U$, $I_{я.д} = \frac{U - E}{r_{я}}$ – меняет направление. $M_{\text{торм}} = -c_M \Phi I_{я.д}$. Энергия двигателя отдается в сеть. Применяется, например, при торможении электропоезда, идущего под уклон.

Для управления электроприводами постоянного тока меньшей мощности используют управляемые выпрямители, при помощи которых получают такое же регулирование скорости изменением напряжения U , как показано на рис. 11.24 (управляемые выпрямители будем изучать в курсе электроники).

11.11. Двигатели последовательного возбуждения

Схема замещения приведена на рис. 11.25. Здесь $I_{в} = I_{я}$. При ненасыщенной магнитной системе $\Phi = KI_{в} = KI_{я}$, и тогда $M = c_M \Phi I_{я} = c_M K I_{я}^2$. Поэтому двигатель обладает хорошими пусковыми и перегрузочными свойствами.

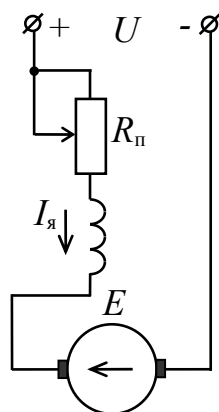


Рис. 11.25. Схема замещения двигателя последовательного возбуждения

Он может развивать большие моменты M при сравнительно небольших токах якоря $I_{я}$. Его механическая характеристика

$$\Omega = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_{\text{я}} + r_{\text{в}}}{c_E^2 \Phi^2} M = \frac{1}{c_E \Phi} \left(U - \frac{r_{\text{я}} + r_{\text{в}}}{c_E \Phi} M \right).$$
 Механические характеристики мягкие (рис. 11.26). Используются при нагрузках выше $0,25P_{\text{н}}$. Если меньше – «идет вразнос». Ременные передачи запрещаются!

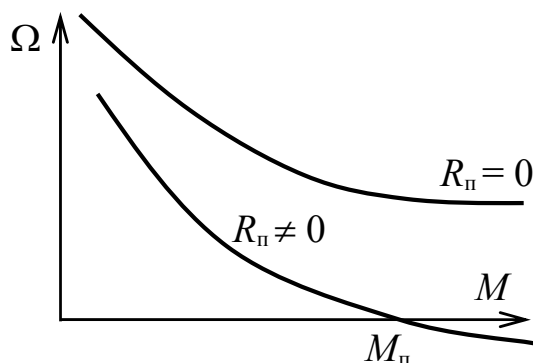


Рис. 11.26. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

Широко используется как тяговый двигатель на транспорте и в крановых установках.

Регулирование скорости и торможения – примерно такое же, как и ранее рассмотренное (изменение U , $R_{\text{я}}$, Φ).

Вопросы

11.1. Общие сведения

1. Машина как преобразователь энергии одного вида в другой.
2. Что такое генераторы и двигатели?
3. Применение генераторов постоянного тока (ГПТ).
4. Применение двигателей постоянного тока (ДПТ).
5. Преимущества машин постоянного тока (МПТ).
6. Недостатки МПТ.

11.2. Устройство машин постоянного тока

1. Схема конструкции МПТ.
2. Назначение статора и его конструкция.
3. Назначение якоря и его конструкция.
4. Назначение щеточно-коллекторного узла и его конструктивное исполнение.

11.3. Режимы работы машин постоянного тока МПТ

1. Упрощенная схема двухполюсной МПТ.

2. Работа МПТ в режиме генератора (ГПТ).
 - 2.1. В результате чего в обмотке якоря возникает ЭДС $E_{\text{я}}$?
 - 2.2. В каком случае в обмотке якоря протекает ток $I_{\text{я}}$ и создает противодействующий электромагнитный момент якоря $M_{\text{эм}}$?
 - 2.3. Какую мощность должен иметь двигатель, вращающий якорь ГПТ?
3. Работа МПТ в режиме двигателя (ДПТ).
 - 3.1. Что надо сделать, чтобы МПТ стала работать в режиме ДПТ?
 - 3.2. На что расходуется мощность постороннего источника при работе ДПТ?

11.4. Преобразование энергии и КПД МПТ

1. Экономия энергии – задача государственной важности!
2. Диаграммы мощностей МПТ в режиме ГПТ и в режиме ДПТ.
3. Зависимость номинального КПД машины от номинальной мощности машины, т. е. $\eta = f(P_{\text{ном}})$.

11.5. Способы возбуждения МПТ

1. Независимое возбуждение: схема.
2. Параллельное возбуждение: схема.
3. Последовательное возбуждение: схема.
4. Смешанное возбуждение: схема.

11.6. Генератор независимого возбуждения

1. Схема генератора с возможностью изменения полярности напряжения $U_{\text{н}}$ на нагрузке.
2. Как получить реверсивную систему Г–Д (генератор–двигатель)?
3. Внешняя характеристика ГПТ $U_{\text{н}} = f(I_{\text{я}})$.
4. Регулировочная характеристика $I_{\text{в}} = f(I_{\text{я}})$ и ее назначение.
5. Недостаток МПТ независимого возбуждения.
6. Защита от токов короткого замыкания.

11.7. Генератор параллельного возбуждения

1. Схема ГПТ параллельного возбуждения.
2. Три условия самовозбуждения генератора.
3. Замкнутый круг намагничивания ГПТ.
4. Внешняя характеристика $U_{\text{н}} = f(I_{\text{н}})$.
5. Защита от токов короткого замыкания.

11.8. Генератор смешанного возбуждения

1. Схема ГПТ смешанного возбуждения.
2. Соотношения числа витков ШОВ и СОВ.

3. Самовозбуждение ГПТ смешанного возбуждения.
4. Внешняя характеристика при согласном включении ШОВ и СОВ.
5. Внешняя характеристика при встречном включении ШОВ и СОВ.

11.9. Двигатели постоянного тока

1. Как ГПТ превратить в ДПТ?
2. Упрощенная схема МПТ в режиме ДПТ.
3. От чего зависит ток якоря $I_{\text{я}}$?

11.10. Двигатели параллельного и независимого возбуждения

1. Схема замещения ДПТ параллельного возбуждения.
2. Назначение пускового $R_{\text{п}}$ и регулировочного $R_{\text{р}}$ реостатов.
3. Для чего во время пуска ДПТ устанавливают $R_{\text{п}} = R_{\text{пmax}}$, а $R_{\text{р}} = 0$, т. е. $\Phi = \Phi_{\text{max}}$?
4. А после разгона двигателя $R_{\text{п}} = ?$, $R_{\text{р}} = ?$
5. Саморегулирующая роль противоЭДС якоря $E_{\text{я}}$.
6. Схема замещения ДПТ независимого возбуждения.
7. Механические характеристики $\Omega = f(M)$ ДПТ параллельного и независимого возбуждения для различных $R_{\text{р}}$.
8. Регулирование скорости вращения якоря путем изменения тока возбуждения $I_{\text{в}}$.
9. Торможение противовключением.

11.11. Двигатель последовательного возбуждения

1. Схема замещения ДПТ.
2. Достоинства ДПТ последовательного возбуждения.
3. Механические характеристики $\Omega = f(M)$.
4. Применение.

ГЛАВА 12 АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

12.1. Общие сведения

Вопрос – как экономно мы используем предоставленную нам электроснабженцами электрическую энергию – должен всегда интересовать пользователя электрической энергии. А как мы используем электрическую энергию, можно определить при помощи диаграммы потерь мощности в процессе ее использования, и рассчитать коэффициент полезного действия потребляемой нами энергии как отношение полученной мощности из сети к мощности, затраченной на выполнение полезной работы (КПД):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (12.1)$$

где P_1 – мощность, полученная из электрической сети (от источника); P_2 – полезная (производительная) мощность.

Как и любые электрические двигатели, асинхронные двигатели преобразуют электрическую энергию трехфазной или однофазной электрической системы источников в механическую энергию вращающегося ротора (вращающегося вала).

Асинхронными эти двигатели называются потому, что скорость вращения магнитного поля статора, которое увлекает за собой ротор, не совпадает со скоростью вращения ротора, т. е. магнитное поле статора и ротор вращаются несинхронно (асинхронно). Обычно ротор отстает от вращающегося магнитного поля статора. Это и создает вращающий момент асинхронного двигателя.

Асинхронные двигатели могут быть однофазными, двухфазными и трехфазными. Для получения мощности $P > 500$ Вт используют трехфазные асинхронные двигатели.

Трехфазные асинхронные двигатели изобрел русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский. Конструкция его двигателя была настолько проста и надежна, что в общих чертах сохраняется до настоящего времени.

Достоинства асинхронных двигателей – надежность в эксплуатации, простота конструкции и низкая стоимость. При этом имеет хорошую механическую характеристику и поэтому широко применяется для привода различных машин и механизмов, где не требуется

строго постоянная скорость вращения и регулирования ее, а также в бытовых электроустановках (однофазные двигатели). Выпускаются промышленностью мощностью от долей ватта до тысяч киловатт.

12.2. Конструкция трехфазного АД

Асинхронный двигатель состоит из двух основных частей – неподвижного статора и вращающегося ротора (рис. 12.1).

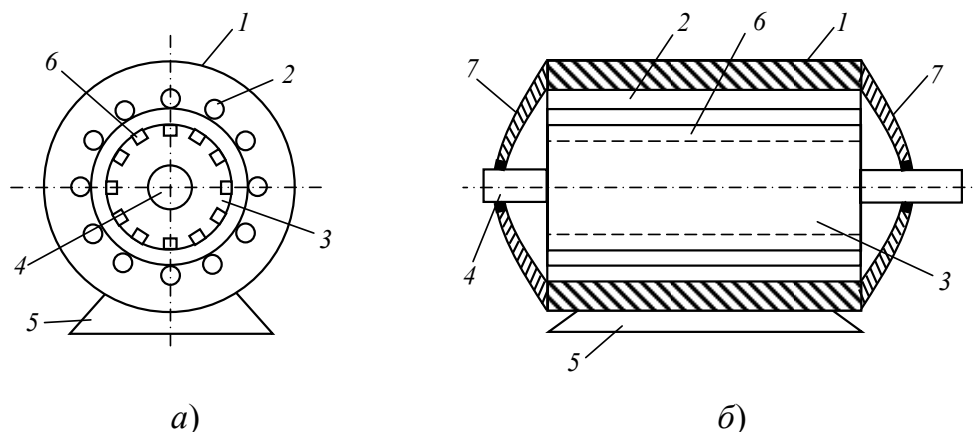


Рис. 12.1. Устройство асинхронного двигателя с КЗ ротором:
 а – вид с торца при снятой крышке; б – вид сбоку: 1 – статор со снятой крышкой; 2 – обмотка статора; 3 – ротор; 4 – вал;
 5 – подставка для крепления двигателя; 6 – обмотка ротора;
 7 – крышки двигателя с подшипниками

Статор. Литой или сварной цилиндрический корпус со специальными «лапами» для крепления двигателя на фундаменте. Внутри корпуса впрессован сердечник из специальной электротехнической стали, состоящий из тонких изолированных друг от друга пластин, сердечник статора имеет пазы для укладки в них обмотки статора из изолированных проводов. Обмотка представляет собой многовитковые катушки, соединенные между собой соответствующим образом в трехфазную цепь для создания внутри статора вращающегося магнитного поля, магнитно-силовые линии которого замыкаются через сердечник статора. Для уменьшения нагрева сердечника вихревыми токами (токами Фуко) он выполнен из тонких изолированных пластин (листов).

Для подключения двигателя к трехфазной сети и соединения обмоток в «звезду» или «треугольник» начала и концы обмоток выведены на специальный щиток с винтами и гайками. Щиток закреплен на цилиндре (на статоре).

Ротор – вращающаяся часть асинхронного двигателя, помещается внутрь статора. Выполняется в виде цилиндра, который, как и в статоре, набран из тонких изолированных пластин (листов). На поверхности сердечника имеются пазы для создания обмотки ротора.

Применяют два типа ротора. Один тип – ротор с короткозамкнутой обмоткой. В этом роторе в пазы сердечника вставляют медные или алюминиевые стержни, а с торцов все стержни замыкают медными кольцами. Получается короткозамкнутая обмотка типа «беличья клетка». Такой АД называется асинхронным двигателем с КЗ ротором.

Второй тип – ротор с фоновой обмоткой. В этом случае в пазы сердечника укладываются многовитковые катушки из изолированного провода и три вывода обмотки (P_1 , P_2 , P_3) присоединяются к трем контактными кольцам, находящимся на валу и изолированным друг от друга и от вала. При помощи щеток, скользящих по кольцам, обмотка ротора подсоединяется к пусковому и регулирующему реостату, который установлен вне двигателя. Такой двигатель называют АД с фазовой обмоткой (см. рис. 12.1).

12.3. Вращающееся магнитное поле статора

Как было ранее сказано, в асинхронном двигателе ротор увлекается вращающимся магнитным полем статора и начинает тоже вращаться. Ротор расположен на валу, который укреплен в подшипниках, находящихся в торцевых крышках цилиндра статора.

Рассмотрим принцип получения вращающегося магнитного поля в статоре трехфазного асинхронного двигателя, например, с обмоткой статора, соединенной звездой. Для простоты рассмотрим двигатель с одной парой полюсов статора. В этом случае фазовые обмотки $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ сдвинуты друг относительно друга по окружности статора на угол 120° . По этим обмоткам протекают фазные токи i_A , i_B , i_C , также сдвинутые относительно друг друга на угол $\varphi t = 120^\circ$ (рис. 12.2).

Протекая по своим фазным обмоткам, эти токи создают магнитные потоки. А так как токи сдвинуты во времени, они следуют друг за другом. А это значит, что и магнитные потоки в фазных обмотках возникают последовательно во времени Φ_A , Φ_B , Φ_C , а фазные обмотки, как мы помним, сдвинуты в пространстве по окружности статора на 120° друг от друга. Таким образом, в статоре создается вращающееся магнитное поле. На рис. 12.2 поле вращается против часовой стрелки.

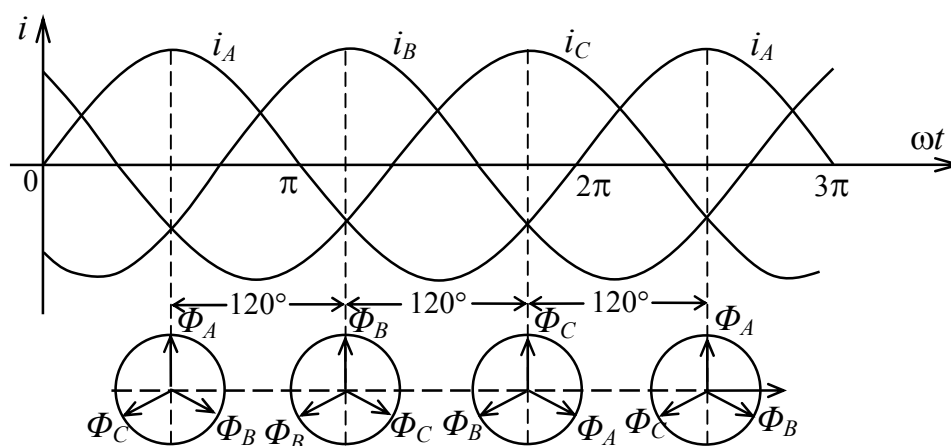


Рис. 12.2. Временные диаграммы токов обмотки статора и магнитные потоки при этом

Из рис. 12.2 легко заметить, что за полный период протекания тока, т. е. $\omega t = 2\pi$, магнитное поле совершает полный оборот при количестве пар полюсов $P = 1$. Частоту вращения магнитного поля, т. е. сколько оборотов за одну минуту, можно определить из известной простой формулы

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{P}, \quad (12.2)$$

где f_1 – частота питающего синусоидального тока. В Европе и у нас $f_1 = 50$ Гц.

Следовательно, при $P = 1$ частота вращения магнитного поля $n_1 = \frac{50 \cdot 60}{1} = 3000$ об/мин. При увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается: при $P = 2$ $n_1 = 1500$ об/мин, при $P = 3$ $n_1 = 1000$ об/мин.

В рассмотренном нами случае магнитное поле вращается против часовой стрелки. При необходимости изменить направление вращения на обратное, достаточно поменять местами подключенные к обмотке статора фазы трехфазного источника питания – фазы A и B , или B и C , или A и C .

12.4. Принцип действия асинхронного двигателя. Скольжение

Ротор находится внутри статора. При подключении обмотки статора к трехфазной системе ЭДС в обмотке статора будет протекать

ток, который создает вращающееся магнитное поле. Магнитный поток статора пересекает проводники обмотки ротора, в которых наводится ЭДС по закону электромагнитной индукции $e_p = -W_p \frac{d\Phi}{dt}$. Так

как проводники обмотки ротора замкнуты, то по ним под воздействием ЭДС e_p потечет ток i_p . Этот ток взаимодействует с магнитным полем, в результате чего на проводники с током действуют электромагнитные силы. Они создают вращающий момент $M_{вр}$, который заставляет вращаться ротор в сторону вращения магнитного поля.

Как известно, магнитное поле вращается со скоростью $\Omega_0 = \frac{\omega}{P_1} = \frac{2\pi f_1}{P_1}$, где $f_1 = 50$ Гц, а P_1 – число пар полюсов обмотки статора. Скорость вращения ротора Ω всегда меньше скорости вращения магнитного поля, т. е. $\Omega < \Omega_0$. Даже в режиме холостого хода, когда на валу двигателя нет нагрузки, скорость вращения ротора меньше скорости Ω_0 , т. е. ротор всегда вращается несинхронно с магнитным полем. Поэтому такие двигатели называются асинхронными. Это легко объяснить. Если бы было $\Omega = \Omega_0$, то магнитное поле статора не пересекало бы витки обмотки ротора и в них не индуцировался бы ток i_p . А нет тока i_p – нет и момента $M_{вр}$.

Постоянное отставание ротора от магнитного поля статора называется скольжением. Скорость скольжения обозначается как

$$\Omega_s = \Omega_0 - \Omega. \quad (12.3)$$

Обычно скольжением называют относительное скольжение

$$S = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (12.4)$$

Следует отметить, что скольжение является алгебраической величиной, так как Ω – величина алгебраическая. Положительная $+ \Omega$, когда направление вращения ротора совпадает с направлением магнитного поля статора.

Графически, при постоянной скорости вращения магнитного поля $\Omega_0 = \text{const}$, скорость вращения ротора можно выразить в виде прямой

$$\Omega = \Omega_0(1 - S), \quad (12.5)$$

изображенной на рис. 12.3.

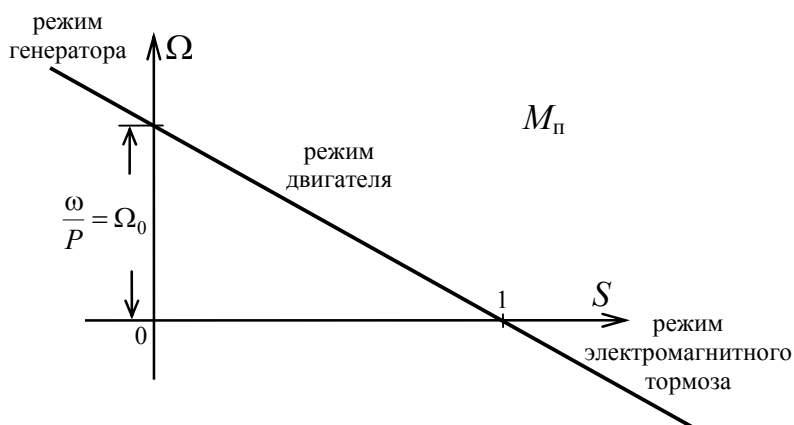


Рис. 12.3. Характеристика скольжения

Из характеристики скольжения видим:

при $S = 0$, $\Omega = \Omega_0$ – идеальный холостой ход;

при $S = 1$, $\Omega = 0$ – ротор неподвижен (при пуске);

при $S < 0$, $\Omega > \Omega_0$ – генераторный режим;

при $0 < S < 1$, $\Omega < \Omega_0$ – двигательный режим;

при $S > 1$ – тормозной режим.

Иногда скольжение выражают в процентах. Тогда

$$S = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} 100 \%, \text{ или } S = \frac{n_0 - n}{n_0} 100 \%.$$

Обычно: в режиме холостого хода $S_{xx} \approx 1 \%$, при номинальной нагрузке $S_{ном} = (4-6) \%$.

12.5. ЭДС статора и ротора. Электромагнитный момент

Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в обмотке статора, вращается со скоростью $\Omega_0 = \frac{2\pi f_1}{P_1}$. Магнитный поток Φ этого поля пронизывает витки обмотки и статора, и ротора, и индуцирует в них ЭДС. Эти ЭДС E_1 статора и ЭДС E_2 ротора зависят как от величины Φ , так и от скорости пересечения магнитным полем проводников этих обмоток. Поэтому ЭДС обмотки статора

$$E_1 = c_{1E} \Phi \Omega_0, \quad (12.6)$$

а ЭДС обмотки ротора

$$E_2 = c_{2E} \Phi \Omega_S. \quad (12.7)$$

Здесь c_{1E} и c_{2E} – постоянные, зависящие от устройства и размеров обмотки статора и ротора; Φ – главный магнитный поток двигателя; Ω_s – скорость скольжения.

Под действием ЭДС E_2 в каждой фазе обмотки ротора протекает ток I_2 . Каждую фазу обмотки ротора можно представить в виде схемы замещения, как показано на рис. 12.4.

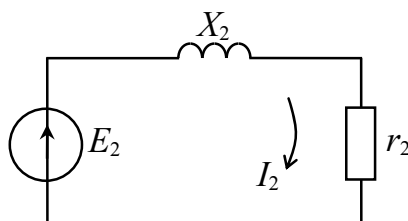


Рис. 12.4. Схема замещения одной фазы обмотки ротора

Тогда действующее значение тока ротора

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} = \frac{E_{2п} S}{\sqrt{r_2^2 + X_{2п}^2 S^2}}, \quad \text{а угол сдвига фаз тока}$$

$\varphi_2 = \arctg \frac{X_{2п}}{r_2} S$, где $E_{2п}$ и $X_{2п}$ – значение ЭДС E_2 и индуктивного сопротивления X_2 при пуске, когда $S = 1$.

Как видно из формул, и ток и угол сдвига зависят от скольжения S . При пуске $S = 1$, а E_2 , I_2 , φ_2 – максимальны.

При увеличении скорости вращения Ω ротора скольжение S уменьшается и, следовательно, E_2 , I_2 , φ_2 уменьшаются.

В результате взаимодействия тока I_2 в обмотке ротора с магнитным потоком Φ возникает электромагнитный момент, вращающий ротор

$$M = c_M I_{2акт} \Phi, \quad (12.8)$$

где c_M – постоянная, зависящая от устройства и размеров ротора;

$$I_{2акт} = I_2 \cos \varphi_2, \quad (12.9)$$

где $I_{2акт}$ – активная составляющая тока; φ_2 – угол между E_2 и I_2 в обмотках ротора.

12.6. Мощность и КПД асинхронного двигателя

Нас всегда должен интересовать вопрос – а где мы бесполезно теряем мощность $P_{\text{потерь}} = P_1 - P_2$?

Мысленно представим себе, где могут быть потери мощности, «проходя путь энергии» от P_1 источника до получения полезной мощности P_2 :

$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1$ – активная мощность из трехфазной сети;

P_{1c} , P_{2c} – потери на перемагничивание сердечников и вихревые токи статора и ротора;

$P_{1\vartheta}$, $P_{2\vartheta}$ – потери в проводах обмоток статора и ротора;

$P_{\text{мех}}$ – механические потери (трение в подшипниках, о воздух и т. п.).

Расход мощности для наглядности можно представить в виде диаграммы преобразования мощности (рис. 12.5).

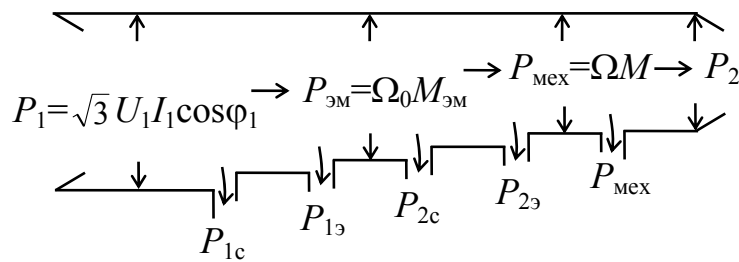


Рис. 12.5. Диаграмма расхода мощности АД

$P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, которая передается от статора к ротору посредством вращающегося магнитного поля:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - (P_{1c} + P_{1\vartheta}) = \Omega_0 M_{\text{эм}}.$$

$P_{\text{мех}}$ – механическая мощность ротора, вращающегося со скоростью Ω .

В конкретном асинхронном двигателе полезная мощность P_2 указывается в паспорте. КПД асинхронных двигателей в зависимости от мощности могут быть в пределах $\eta = 0,75-0,95$. Чем больше мощность, тем больше КПД.

Так как обмотки статора и ротора имеют еще и индуктивное сопротивление X_c и X_p , то из сети, кроме активной мощности P_1 , потребляется и реактивная мощность Q_1 .

Следовательно, коэффициент мощности АД $\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$.

С увеличением нагрузки активная мощность P_1 увеличивается, а реактивная Q_1 в пределах до номинальной нагрузки имеет неизменное значение. Поэтому $\cos \varphi_1$ увеличивается. В режиме холостого хода $\cos \varphi_1 = 0,08-0,15$, а при номинальной нагрузке $\cos \varphi_1 = 0,75-0,95$. Отсюда следует вывод: *нагружайте АД как можно ближе к номинальной нагрузке!*

12.7. Механическая и рабочие характеристики асинхронного двигателя

Основной характеристикой асинхронного двигателя является механическая характеристика – зависимость скорости вращения ротора Ω от момента M , вращающего ротор, т. е. $\Omega = f(M)$. Аналитически это весьма громоздкая формула. Поэтому механическую характеристику строят по двум формулам – зависимостям $\Omega = f(S)$ и $M = f(S)$.

Ранее мы показали, что скорость скольжения $\Omega_s = \Omega_0 - \Omega$, а $E_2 = c_{2E} \Phi \Omega_s$, и что при увеличении нагрузки на валу скольжение увеличивается. При этом увеличиваются взаимосвязанные параметры $\Omega_s \uparrow \rightarrow E_2 \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow M \uparrow$. Приблизительно зависимость $M = f(S)$ выражают формулой

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_{\text{кр}}} + \frac{S_{\text{кр}}}{S}}, \quad (12.10)$$

где при $S = S_{\text{кр}}$ $M = M_{\text{кр}}$, а графически она изображена на рис. 12.6.

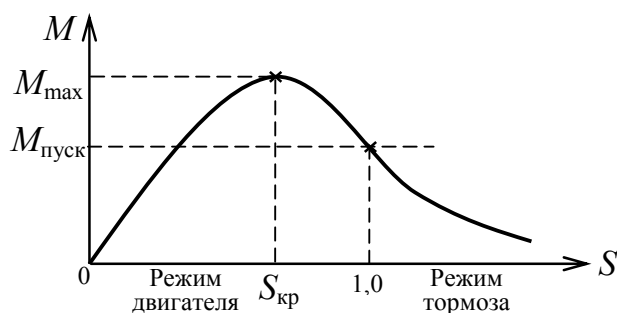


Рис. 12.6. Зависимость момента от скольжения

Тогда главная характеристика асинхронного двигателя $\Omega = f(M)$ для двух значений сопротивлений обмотки ротора: естественная характеристика (с малым сопротивлением $r_{\text{акт}}$ ротора) и искусственная характеристика 2 (с большим искусственным сопротивлением $r_{\text{акт}}$ ротора) (рис. 12.7).

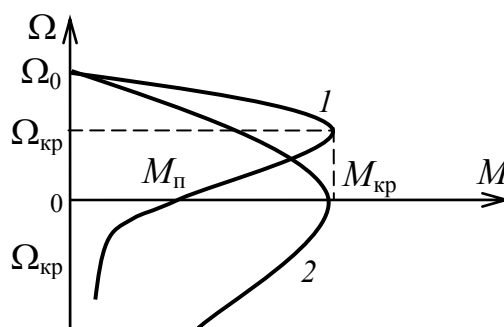


Рис. 12.7. Механические характеристики:
1 – с малым сопротивлением (естественная);
2 – с большим сопротивлением (искусственная)

Механические характеристики на рис. 12.7 показывают, что можно изменять наклон механической характеристики путем изменения активного (резистивного) сопротивления в цепи обмотки ротора, регулируя таким образом момент на валу двигателя и скорость вращения.

Механическая характеристика 1 показывает, что при активном сопротивлении цепи ротора, обусловленном сопротивлением провода обмотки ротора (при малом $r_{\text{акт.1}}$), скорость вращения ротора Ω мало изменяется в диапазоне изменения момента M от нуля и до критического значения $M_{\text{кр}}$. При достижении $M = M_{\text{кр}}$ АД останавливается (см. рис. 12.7).

Механическая характеристика 2 показывает, что, увеличивая активное сопротивление в цепи ротора, можно увеличить момент на валу АД до величины $M_{\text{п}} = M_{\text{кр}}$ при $\Omega = 0$. Это явление используют при пуске асинхронных двигателей.

Механическая характеристика характеризует АД как привод, его способность приводить во вращение какие-либо устройства.

Но для пользователя немаловажны и его другие характеристики, отражающие его свойства как конкретного двигателя. Это зависимости основных параметров от полезной мощности двигателя, обычно

от относительной мощности $\frac{P_2}{P_{2н}}$. Эти характеристики называют рабочими характеристиками: скорости вращения $R_c = 44$ Ом, вращающегося момента $M = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$, тока $I_1 = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$, коэффициент мощности $\cos \varphi = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$ и КПД $\eta = f\left(\frac{P_2}{P_{2н}}\right)$.

Эти рабочие характеристики снимаются при номинальных значениях напряжения обмотки статора $U_1 = U_{1ном}$ и частоте сети $f_{ном}$.

На рис. 12.8 приведены рабочие характеристики АД, отражающие вид зависимостей n , M , I_1 , $\cos \varphi$, η от отношения полезной мощности на валу АД к потребляемой мощности из сети, т. е. $\frac{P_2}{P_{2н}}$.

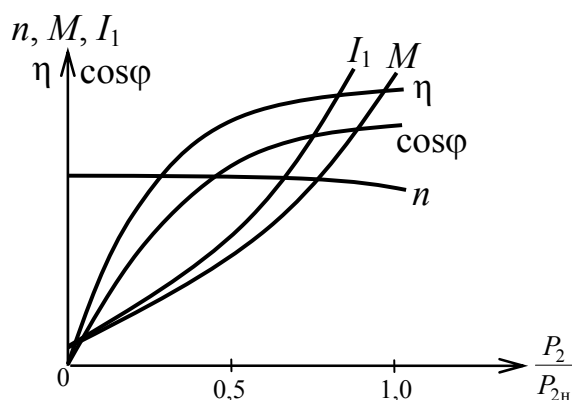


Рис. 12.8. Рабочие характеристики

По рабочим характеристикам выбирается режим работы АД.

12.8. Пуск асинхронных двигателей

Энергия при пуске расходуется на преодоление механического момента на валу $M_{мех}$ и динамического момента $M_{дин}$:

$$M_{пуск} = M_{мех} + M_{дин} = M_{мех} + j \frac{d\Omega}{dt}.$$

При этом токи в двигателе вырастают в несколько раз. При запуске мощных двигателей может кратковременно снизиться напряжение сети. Это неблагоприятно отражается на электрической сети и

на других двигателях, питающихся от этой же сети. Поэтому возникает насущная задача при пуске – ограничить пусковой ток при включении двигателя, но при этом, по возможности, получить максимальный пусковой момент $M_{\text{пуск}}$.

1. Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором

Ранее мы выяснили, что момент двигателя зависит от активной составляющей тока ротора

$$I_{2\text{акт}} = I_2 \cos \varphi_2. \quad (12.11)$$

Чем больше угол φ_2 между I_2 и E_2 , тем меньше $\cos \varphi_2$, тем меньше момент M на валу ротора, так как меньше $I_{2\text{акт}}$.

При максимальном скольжении $S=1$, когда ротор не вращается во время пуска, частота f_2 ЭДС и тока ротора максимальна и, следовательно, максимально индуктивное сопротивление X_p обмотки ротора, в то время когда активное сопротивление r_p обмотки ротора осталось практически неизменным. А это значит, что при этом угол φ_2 будет максимальным, т. е. $\cos \varphi_2$ будет минимальным, что, естественно, до минимума уменьшит момент двигателя. И поэтому не произойдет пуск двигателя.

Для существенного *уменьшения* тока ротора при пуске двигателя и *увеличения* пускового момента $M_{\text{пуск}}$ в цепь обмотки ротора включают трехфазный пусковой реостат или 2–3 группы сопротивлений при наличии возможности в нужный момент при разгоне двигателя замыкать резисторы вначале одной группы, а потом другой группы активных сопротивлений. Посмотрим, как в этом случае изменяется механическая характеристика и происходит пуск двигателя при помощи такого пускового реостата (рис. 12.9, 12.10).

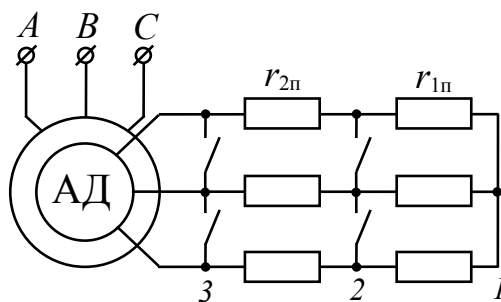


Рис. 12.9. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

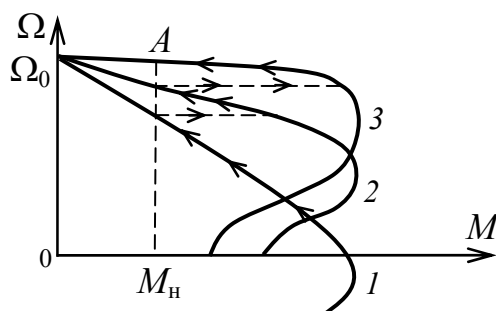


Рис. 12.10. Механические характеристики АД при трехступенчатом пуске

При подключении двигателя к сети пусковой реостат был полностью подключен к обмотке ротора. Разгон двигателя начался при максимальном моменте по механической характеристике 1. При достижении $M = M_n$ (номинального значения) группу сопротивлений $r_{1п}$ реостата закорачивают, момент M скачком «переходит» на характеристику 2 и по ней происходит разгон до $M = M_n$. После этого закорачивают (перемыкают) группу $r_{2п}$ и далее разгон происходит по третьей характеристике до $M = M_n$. Пуск закончен.

2. Пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором сразу включают в электрическую сеть, без пусковых реостатов, как показано на рис. 12.11. Питание к АД подают путем замыкания контактов К пускового реле или контактора. Подробнее пуск двигателя рассмотрим в § 14 на рис. 14.2.

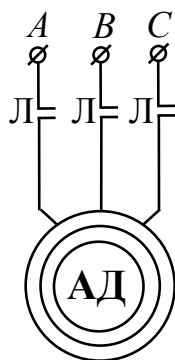


Рис. 12.11. Пуск АД с короткозамкнутым ротором

Для уменьшения пускового тока используют специальную конструкцию ротора.

- Ротор типа «беличье колесо» – с глубокими пазами, в которые укладываются медные проводники прямоугольной формы, как показано на рис. 12.12. Глубина паза в 10 раз больше, чем ширина.

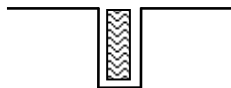


Рис. 12.12. Проводник глубокопазного ротора

Во время пуска, когда частота индуцируемого тока ротора i_2 максимальна и равна частоте сети $f = 50$ Гц, проявляется скин-эффект (поверхностный эффект). Сущность его заключается в том, что токи в проводнике «выталкиваются» к поверхности проводника – получается эффект значительного увеличения сопротивления внутренней части. Поэтому во время пуска плотность тока вверху проводника увеличивается, увеличивается пусковой момент и двигатель разгоняется. По мере увеличения скорости вращения скольжение уменьшается, частота тока i_2 уменьшается до 2–4 Гц и плотность тока в проводнике по всей высоте паза становится равномерной.

- Ротор типа «двойное беличье колесо».

В этом случае ротор состоит из двух клеток: наружная клетка – в наружных пазах укладываются латунные проводники (стержни), внутренняя клетка – проводники из меди, как показано на рис. 12.13.



Рис. 12.13. Фрагмент «двойной беличьей клетки»

При пуске ток вытесняется во внешнюю клетку и определяет пусковой момент $M_{\text{пуск}}$. Но так как латунь имеет более высокое электрическое сопротивление, то при пуске ток I_2 не превышает допустимого значения.

А после разгона двигателя, когда частота тока i_2 $f = 2\text{--}4$ Гц, ток ротора протекает, в основном, по внутреннему медному проводнику с малым сопротивлением.

Но двигатель с двойной клеткой дороже!

12.9. Торможение АД

Если отключить двигатель от источника электрической энергии (от сети), то он остановится в своем вращении. Если, конечно, на него, т. е. на агрегат, который он приводит в движение, не действует посторонняя сила, например, сила тяжести. Но такое, естественное, торможение чаще всего не устраивает пользователя. Поэтому к процессу торможения в различных случаях предъявляются различные требования: и ограниченность во времени, и компенсация посторонней силы и др.

1. Генераторное торможение

Асинхронный двигатель используется в качестве привода подъемной лебедки. При опускании большого груза скорость ротора Ω_2 может оказаться больше скорости Ω_1 вращения магнитного поля. При этом скольжение S становится $S > 1$ (см. рис. 12.3), а ЭДС E_1 статора становится больше напряжения сети, т. е. $E_1 > U$, в результате чего ток статора I_1 меняет направление и магнитное поле начинает вращаться в обратную сторону, т. е. против вращения ротора, который вращает опускаемый груз. Электромагнитный момент также меняет направление и становится тормозящим.

2. Торможение противовключением

В этом случае для быстрой остановки двигателя изменяют направление вращения магнитного поля путем переключения любых двух фаз обмотки статора. Магнитное поле статора будет вращаться против направления вращения ротора, создавая тормозной момент. Однако, как только ротор остановится, т. е. $\Omega_2 = 0$, двигатель необходимо отключить от сети. В противном случае момент тормозной превратится в момент пусковой и раскрутит ротор в обратную сторону.

3. Динамическое торможение

Для включения динамического торможения сначала отключают обмотку статора от трехфазной сети переменного тока и подключают ее к цепи постоянного тока. По статорной обмотке протекает постоянный ток I_1 и создает неподвижное магнитное поле. В обмотке вращающегося ротора в постоянном магнитном поле индуцируется ЭДС E_2 , под действием которой по обмотке ротора протекает ток I_2 и, взаимодействуя с магнитным полем, создает тормозной момент. При полной остановке ротора тормозной момент исчезает, так как $E_2 = 0$, $I_2 = 0$.

12.10. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя

Известно, что скорость вращения магнитного поля обмотки статора АД

$$\Omega_0 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (12.12)$$

где p – число пар полюсов обмотки статора; f_1 – частота питающего напряжения сети.

Следовательно, из этой формулы видно, что можно изменять (регулировать) скорость вращения Ω_0 путем изменения f_1 или p .

1. Частотное регулирование

Как видим из формулы (12.12), скорость вращения магнитного поля Ω_0 пропорциональна частоте f_1 переменного напряжения обмотки статора, создающей протекающим переменным током I_1 вращающееся магнитное поле со скоростью вращения Ω_0 . Однако, если пренебречь потоками рассеяния, то можно напряжение питания U_1 сети приравнять ЭДС E_1 , т. е. $U_1 \approx E_1 = c_{1E} \Omega_0 \Phi$. Отсюда магнитный поток Φ , создаваемый обмоткой статора:

$$\Phi = \frac{U_1}{c_{1E} \Omega_0} = \frac{U_1 p}{c_{1E} 2\pi f_1}, \quad (12.13)$$

где p – число пар полюсов.

Из формулы (12.12) видно, что при уменьшении частоты f_1 уменьшается скорость вращения Ω_0 , а из формулы (12.13) видно, что при этом увеличивается магнитный поток Φ , в результате чего увеличиваются токи в обмотках, уменьшается $\cos \varphi$ и КПД η .

Поэтому при частотном регулировании необходимо одновременно и пропорционально изменять f_1 и U_1 . Тогда магнитный поток Φ будет постоянным ($\Phi = \text{const}$).

При таком частотном регулировании максимальный вращающий момент $M_{\max} = \text{const}$, а семейство механических характеристик будет зависеть только от частоты f_1 (рис. 12.14). Для частотного регулирования раньше использовали специальные преобразовательные агрегаты из нескольких машин постоянного и переменного тока.

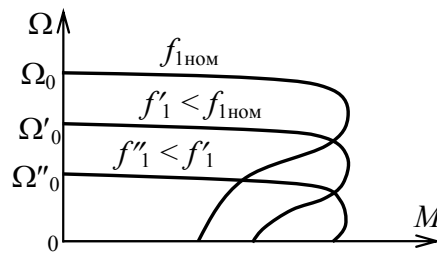


Рис. 12.14. Частотное регулирование

При этом получали низкий КПД и высокую стоимость.

В последнее время стали использовать статические источники питания с регулированием частоты на тиристорах и транзисторах.

2. Регулирование скорости вращения путем изменения числа пар полюсов

Используется в АД с короткозамкнутым ротором.

Число пар полюсов p определяется количеством катушек и способом их соединения в каждой фазе обмотки статора. Если две катушки в фазе соединить последовательно, то получается 2 пары полюсов $p = 2$, а если включить параллельно, то получим одну пару полюсов $p = 1$, как показано на рис. 12.15.

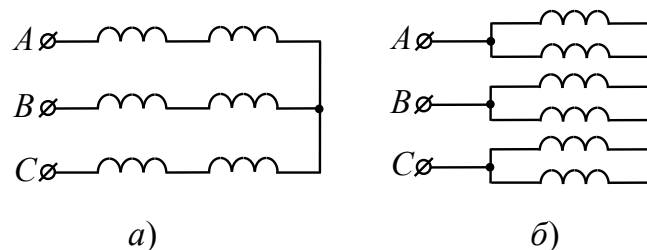


Рис. 12.15. Схемы включения обмоток статора:
 $a - p \approx 2$; $б - p = 1$

Получаем скачкообразное изменение пар полюсов.

В этом способе механические характеристики изменяются скачкообразно, как показано на рис. 12.16. При этом не снижается их жесткость.

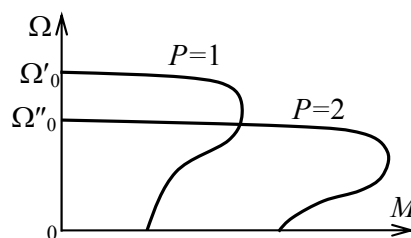


Рис. 12.16. Механические характеристики при регулировании скорости изменением числа пар полюсов

3. Реостатное регулирование скорости

Используют для регулирования скорости вращения АД с фазным ротором, т. е. имеющий обмотки ротора с контактными кольцами на роторе. При помощи контактных щеток последовательно с обмотками подключают регулировочный трехфазный реостат, как при пуске (см. рис. 2.8), но изменение сопротивления реостата может быть и плавным, а не ступенчатым. При этом сопротивление реостата рассчитывают на длительный режим работы. Механические характеристики показаны на рис. 12.17.

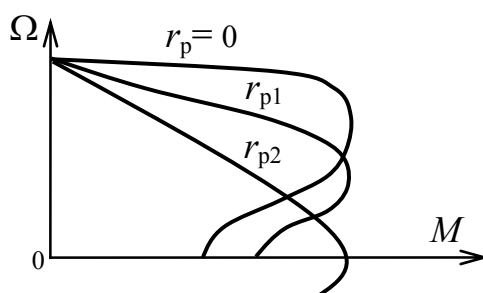


Рис. 12.17. Реостатное регулирование

Реостатное регулирование неэкономичное, так как добавляются еще потери на нагрев реостата. И габариты реостата великоваты. Но простота способа регулирования!

12.11. Однофазные и двухфазные АД

1. Однофазный АД

Однофазные двигатели *имеют* значительно *худшие* экономические и механические показатели, по сравнению с трехфазными АД. Поэтому они применяются в качестве приводов небольшой мощности, в основном там, где имеется однофазная электрическая сеть, т. е. часто в качестве приводов бытовых приборов.

Однофазные АД имеют в статоре одну рабочую обмотку W_p и пусковую обмотку W_n , смещенную в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° (геометрических градусов). Ротор короткозамкнутый, часто в виде металлического *тонкостенного цилиндра*. Схема включения однофазного АД приведена на рис. 12.18.

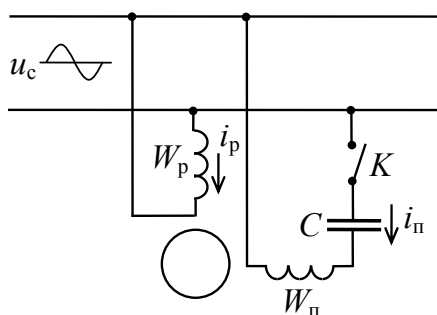


Рис. 12.18. Включение однофазного АД в сеть

У трехфазного АД обмотка статора (трехфазная) создает *круговое* вращающееся магнитное поле, которое увлекает и раскручивает ротор, т. е. у него механическая характеристика имеет *пусковой момент*, как, например, на рис. 12.10.

Обмотка статора *однофазного* АД при протекании синусоидального тока i_p создает *пульсирующий магнитный поток* относительно нулевой величины i_p , то «по часовой стрелке», то «против часовой стрелки». Следовательно, момент вращения M *также меняет* свое направление действия 100 раз в секунду, т. е. пусковой момент $M_n = 0$, и ротор может только вибрировать, но раскрутиться не может. И механическая характеристика будет иметь вид 2, как на рис. 12.19.

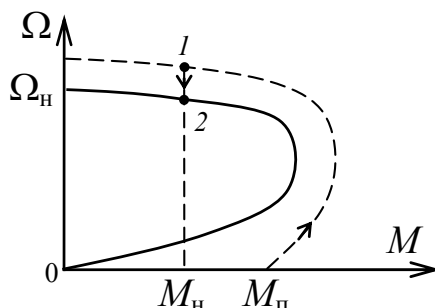


Рис. 12.19. Механическая характеристика однофазного АД

При включении ключа K (см. рис. 12.18) по пусковой обмотке W_n протекает пусковой ток i_n , сдвинутый относительно тока i_p за счет включения конденсатора C , и магнитное поле пусковой обмотки W_n сдвинуто на 90° в пространстве. В результате появляется *вращающееся магнитное поле*, которое имеет пусковой момент M_n . Ротор раскручивается до скорости Ω_1 (точка 1 на рис. 12.19). Ключ K отключают, а ротор двигателя продолжает вращаться под действием M_n со скоростью Ω_n (точка 2 на механической характеристике).

2. Двухфазный АД (конденсаторный)

Однофазный АД, показанный на рис. 12.18, можно превратить в двухфазный за счет постоянной (рабочей) обмотки с конденсатором, как показано на рис. 12.20.

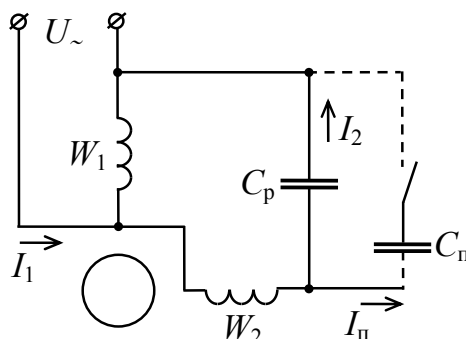


Рис. 12.20. Двухфазный АД

Рабочую емкость C_p выбирают такой, чтобы при *номинальной* нагрузке сдвиг по фазе I_2 был $\alpha \approx 90^\circ$. Тогда магнитное поле будет вращающимся круговым. При этом энергетические показатели будут наилучшими. При необходимости увеличить пусковой момент $M_{\text{п}}$ включают $C_{\text{п}}$ на время пуска.

Вопросы

12.1. Общие сведения

1. Почему АД называют асинхронными?
2. Какие виды асинхронных двигателей выпускаются промышленностью?
3. Достоинства АД.

12.2. Конструкция трехфазного АД

1. Схема конструкции АД.
2. Конструкция статора.
3. Конструкция ротора с фазной обмоткой, с короткозамкнутой обмоткой.

12.3. Вращающееся магнитное поле

1. Обмотки статора $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ соединены звездой.
2. Временные диаграммы фазных токов i_A , i_B , i_C и вращение магнитного поля против часовой стрелки.
3. Частота вращения магнитного поля.

12.4. Принцип действия АД. Скольжение

1. Почему в обмотке ротора возникает ЭДС e_p ?
2. В результате каких взаимодействий возникает момент $M_{вр}$, вращающий ротор?
3. Что такое скольжение и почему оно необходимо для вращения ротора?
4. Характеристика скольжения $\Omega = \Omega_0(1 - S)$. Режимы работы АД в зависимости от S .

12.5. ЭДС статора и ротора. Электромагнитный момент

1. От чего зависят ЭДС обмоток статора и ротора?
2. От чего зависят токи в обмотках ротора согласно схеме замещения одной фазы ротора?
3. От чего зависит электромагнитный момент M , вращающий ротор?

12.6. Мощность и КПД асинхронного двигателя

1. Диаграмма расхода мощности АД.
2. КПД асинхронных двигателей.
3. Коэффициент мощности АД $\cos \varphi_1$.

12.7. Механическая и рабочие характеристики АД

1. Основная характеристика – механическая характеристика $\Omega = f(M)$.
2. Анализ механических характеристик на рис. 12.7.
3. Рабочие характеристики – зависимости M , I_1 , $\cos \varphi$, η и КПД η от $\frac{P_2}{P_{2ном}}$.

12.8. Пуск асинхронных двигателей

1. Главная задача при пуске.
2. Пуск АД с фазным ротором: схема пуска.
3. Механические характеристики при трехступенчатом пуске.
4. Пуск АД с короткозамкнутым ротором. Схема.

12.9. Торможение АД

1. Требования к торможению.
2. Генераторное торможение привода подъемной лебедки.
3. Торможение противовключением.
4. Динамическое торможение.

12.10. Регулирование скорости вращения АД

1. Скорость вращения магнитного поля обмотки статора.
2. Частотное регулирование. Сущность характеристики. Достоинства. Недостатки.

3. Регулирование скорости изменения числа пар полюсов. Сущность. Механические характеристики. Недостатки.

4. Реостатное регулирование скорости. Сущность. Механические характеристики. Достоинства. Недостатки.

12.11. Однофазные и двухфазные АД

1. Однофазный АД. Применение.

2. Схема включения в сеть.

3. Необходимость в пусковой обмотке.

4. Механическая характеристика однофазного АД при пуске и в работе.

5. Двухфазный АД (конденсаторный). Схема включения в сеть.

6. Пуск и работа двухфазного АД.

ГЛАВА 13 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

13.1. Общие сведения

Это электрические машины переменного тока, у которых *скорость вращения ротора строго синхронна с частотой электрической сети*, от которой они питаются энергией (синхронные двигатели), или частота их *ЭДС обмотки* статора синхронна *со скоростью вращения ротора*, приводимого во вращение от *постороннего двигателя* – паровой турбины или гидротурбины (синхронные генераторы).

Синхронные машины, как и другие электрические машины, могут работать в режиме двигателя и в режиме генератора.

Электрические *станции* в основном оснащены синхронными генераторами, мощность которых может быть $1500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ и более. Мощные синхронные генераторы в большинстве случаев работают *совместно* (параллельно) друг с другом на общую электрическую трехфазную сеть. Они также служат автономными источниками электрической энергии на транспорте, в летательных аппаратах, на передвижных электростанциях.

Мощные *синхронные двигатели* устанавливаются на металлургических заводах, на прокатных станах, в шахтах, на трубопроводах, вентиляторах и т. д.

Маломощные синхронные двигатели используются там, где требуется *постоянная скорость вращения ротора* – в системах управления, в различных приборах, в системах звукозаписи и пр.

На специальных мощных синхронных двигателях строят синхронные компенсаторы для увеличения коэффициента мощности ($\cos \varphi$) в сети.

13.2. Принцип действия синхронного генератора

Вообще говоря, во всех электрических машинах используется один принцип, *одна идея* – это взаимодействие *между током индуктивности и магнитным полем*, которое он создает; или между магнитным полем и током в индуктивности, который *создает магнитное поле*.

Различие заключается в том – откуда и какая энергия поступает в машину и в какую энергию она преобразуется в этой машине. Это определяет и конструкцию машины, и назначение, т. е. использование машины.

Как уже сказано, синхронный генератор предназначен для преобразования *механической энергии паровой турбины*, или гидротурбины в электрическую энергию. Но *механическая энергия* непосредственно в электрическую энергию не преобразуется. Следовательно, механическую энергию *предварительно* необходимо преобразовать в энергию переменного магнитного поля, которое в *обмотках* (индуктивностях) машины будет создавать переменную ЭДС и в замкнутой цепи переменный электрический ток.

Отсюда «вытекает» и принцип действия, и конструкция синхронного генератора.

Для уяснения принципа действия синхронного генератора на рис. 13.1 приведена его условная схема конструкции («поперечное сечение»).

Сердечник *статора* синхронной машины собран из изолированных друг от друга листов электротехнической стали для уменьшения нагрева вихревыми токами (токами Фуко). Сердечник крепится в корпусе. В пазах сердечника размещены трехфазная обмотка статора, фазы $A-X$, $B-Y$, $C-Z$, сдвинутые на угол 120° относительно друг друга. В этих обмотках индуцируются фазные ЭДС E_A , E_B , E_C при пересечении их витков магнитным полем.

В синхронных генераторах *статор* почему-то называют *якорем*. И мы его будем так называть.

На рис. 13.1 вращающийся ротор показан в виде магнита $N-S$, который и создает переменное магнитное поле. На практике ротор обычно представляет собой *набор электромагнитов постоянного тока*. Обмотки электромагнитов питаются постоянным током от постоянного источника при помощи контактных колец и щеток.

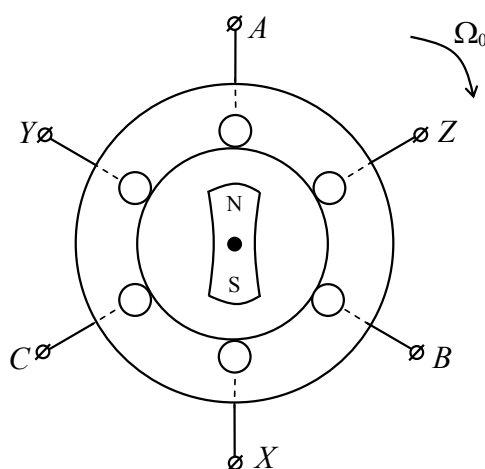


Рис. 13.1. Синхронный генератор

Постоянное магнитное поле электромагнитов при вращении ротора пересекает витки обмоток якоря (статора) и в обмотках индуцируются фазные ЭДС $e_A = E_m \sin \omega t$, $e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ)$ и $e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ)$. Для генератора на рис. 13.1, у которого одна пара полюсов $N-S$, т. е. $p = 1$, $\omega = 2\pi f = \Omega_0$. В общем случае $\omega = p\Omega_0$, где Ω_0 – скорость вращения ротора в секунду. Или через число оборотов в минуту n_0 : $f = \frac{n_0 p}{60} = \text{const}$. Частота f у нас стандартизована $f = 50$ Гц. Поэтому $n_0 = \text{const}$ и поддерживается автоматикой. Следовательно, в зависимости от числа пар полюсов p число оборотов в минуту

$$n_0 = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{3000}{p}. \quad (13.1)$$

В качестве двигателей, механическую энергию которых преобразуют в электрическую на электростанциях, используют *паровые турбины* (в турбогенераторах), или гидротурбины (в гидрогенераторах).

Турбины паровые вращают ротор с большой скоростью ($n_0 = 3000$ об/мин), и поэтому число пар полюсов у турбогенераторов $p = 1$, а $f = \frac{3000 \cdot 1}{60} = 50$ Гц.

При вращении ротора в обмотке каждой фазы якоря индуцируется

$$E_0 = 4,44 f W \Phi_0 K, \quad (13.2)$$

где E_0 – ЭДС фазы; f – частота ЭДС якоря (статора); W – число витков фазной обмотки; Φ_0 – магнитный поток ротора, проникающий в сердечник якоря; K – обмоточный коэффициент обмотки якоря.

Когда генератор работает на нагрузку, то по обмоткам якоря протекают токи, которые создают магнитный поток якоря. Этот магнитный поток воздействует на основной поток возбуждения Φ_0 . Это воздействие называется *реакцией якоря*.

В зависимости от характера нагрузки реакция якоря будет различна.

При активной нагрузке – небольшое размагничивающее действие.

При индуктивной нагрузке – несколько большее размагничивающее действие.

При емкостной нагрузке – некоторое намагничивающее действие.

13.3. Основные характеристики синхронных генераторов

Для оценки работы генераторов и расчетов электрических цепей с генераторами используют различные характеристики – графические зависимости между величинами (параметрами электрической цепи).

1. Характеристика холостого хода

$E_0 = f(I_B)$ при $I = 0$, $\Omega_0 = \text{const}$. Эта характеристика ХХ показывает возможность регулирования величины ЭДС E_0 путем изменения тока возбуждения I_B в обмотках магнитных полюсов ротора.

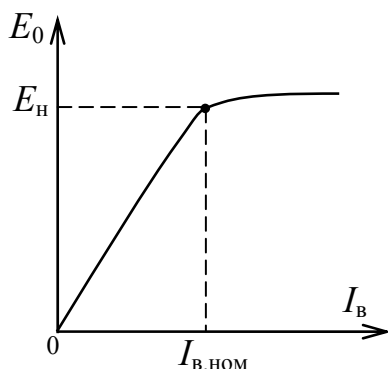


Рис. 13.2. Характеристика ХХ

2. Внешняя характеристика

$U = f(I)$ при $I_B = \text{const}$, $\Omega_0 = \text{const}$ и при различных свойствах (типах) нагрузки, т. е. зависит от различных значений φ . Внешние характеристики строят при постоянном значении $\cos\varphi = \text{const}$. Обычно нагрузка бывает активно-индуктивной. При этом генераторы работают при $\cos\varphi = 0,8\text{--}0,9$. Но в этом случае $\Delta U = \frac{E_H - U_H}{U_H} 100\%$ доходит до 35–45 %, что недопустимо. Поэтому для поддержания постоянным напряжения нагрузки U_H осуществляют автоматическое регулирование путем изменения тока возбуждения I_B , как показано на регулировочной характеристике.

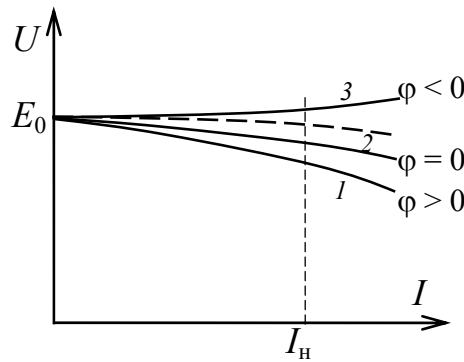


Рис. 13.3. Внешняя характеристика:

$$1 - Z_H = \sqrt{R_H^2 + x_L^2}; 2 - Z_H = R_H; 3 - Z_H = \sqrt{R_H^2 + x_C^2}$$

3. Регулировочная характеристика

$I_B = f(I)$ при $\Omega_0 = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$. Как видим, с увеличением тока якоря I при активно-индуктивной нагрузке для поддержания напряжения $U_H = Z_H I_H$ необходимо увеличивать ток возбуждения I_B (характеристики 1, 2), а при активно-емкостной нагрузке может потребоваться уменьшение тока I_B (характеристика 3).

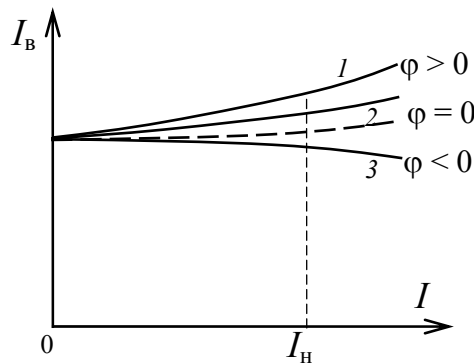


Рис. 13.4. Регулировочная характеристика

4. Одиночно работающие генераторы используются *редко*. Это бывает на небольших, например, сельских электростанциях, передвижных электростанциях.

На крупных электростанциях обычно работают *несколько генераторов*, параллельно включенных на общую нагрузку.

Включение генераторов на параллельную работу – это серьезная задача. Необходимо выполнить целый ряд согласований частоты, напряжения, тока возбуждения и т. д., выполнений определенных условий и порядок их выполнений.

Этими проблемами занимаются опытные специалисты-электрики!

13.4. Принцип действия синхронного двигателя

Синхронная машина обратима, т. е. она может выполнять функцию двигателя. Следовательно, она «в роли» двигателя будет преобразовывать энергию переменного тока, поступающую из электрической сети, в механическую энергию вращающегося ротора.

Вращающий момент M возникает в результате взаимодействия переменного магнитного поля статора, создаваемого электрическим током из сети, с постоянным магнитным полем ротора (по принципу выталкивания проводника с током из магнитного поля). На рис. 13.5 показано, как появляются выталкивающие силы F полюсов электромагнитов ротора из магнитного поля статора, создающие вращающий момент ротора.

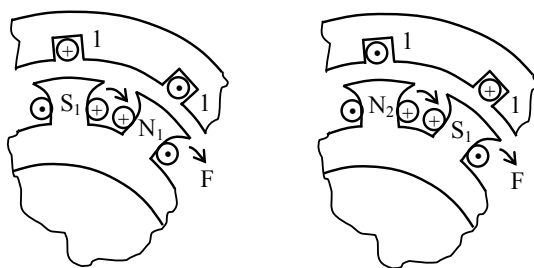


Рис. 13.5. Выталкивающие силы в СД

Для того чтобы ротор вращался со скоростью вращения магнитного поля статора, необходимо, чтобы за полупериод (через $\frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$)

изменения направления магнитного поля ротор успел повернуться на одно полюсное деление (на один полюс). Тогда направление вращения ротора не изменится. Однако сам синхронный двигатель из-за инерционности раскрутиться до синхронной скорости *не может*. Его необходимо предварительно разогнать до синхронной с магнитным полем скорости, а потом включать (вводить) в синхронизм. При этом будет выполняться условие перемещения ротора на один полюс за полупериод $\frac{T}{2}$, и двигатель будет вращать ротор с синхронной скоростью $\Omega_0 = \frac{\omega_0}{p}$ (или $n_0 = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{3000}{p}$).

При наличии нагрузки на валу двигатель развивает момент

При наличии нагрузки на валу двигатель развивает момент

$$M = \frac{3E_0 U_c}{\Omega_0 X} \sin \theta = M_{\max} \sin \theta, \quad (13.3)$$

где E_0 – противоЭДС в обмотке статора, создаваемая магнитным полем вращающегося ротора; U_c – напряжение сети, питающей обмотки статора; θ – угол фазового сдвига между U_c и E_0 ; X – индуктивное сопротивление обмотки статора.

Угол θ характеризует отставание полюсов ротора от «магнитных полюсов» статора при вращении ротора под воздействием механической нагрузки на валу двигателя (рис. 13.6).

Согласно гипотезе Фарадея, магнитные линии поля в воздушном зазоре можно представить в виде упругих нитей. Тогда, при $\theta = 90^\circ$ ($\sin \theta = 1$), $M_{\max} = \frac{3E_0U_c}{\Omega_0 X}$ – максимальный момент.

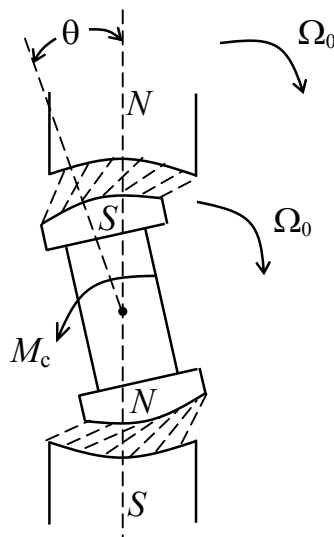


Рис. 13.6. Отставание полюсов ротора от «полюсов» статора

Это означает, что если момент на валу двигателя (M_c – момент сопротивления) превысит M_{\max} , то двигатель «выпадет» из синхронизма («нити порвутся») и двигатель остановится.

13.5. Характеристики синхронного двигателя

1. Угловая характеристика $M = f(\theta)$ – это зависимость момента синхронного двигателя от угла нагрузки θ . Если в уравнении (13.3) приравнять $M_{\max} = \text{const}$, то угловая характеристика будет

$$M = M_{\max} \sin \theta.$$

На рис. 13.7 приведена угловая характеристика для двух значений максимального момента M_{\max} и M'_{\max} . Как видим, угловая характеристика представляет собой полусинусоиду, левая ветвь которой ($0-90^\circ$) соответствует *устойчивой работе двигателя*, а правая ветвь ($90-180^\circ$) – соответствует *неустойчивой*, т. е. при $\theta > 90^\circ$ двигатель останавливается.

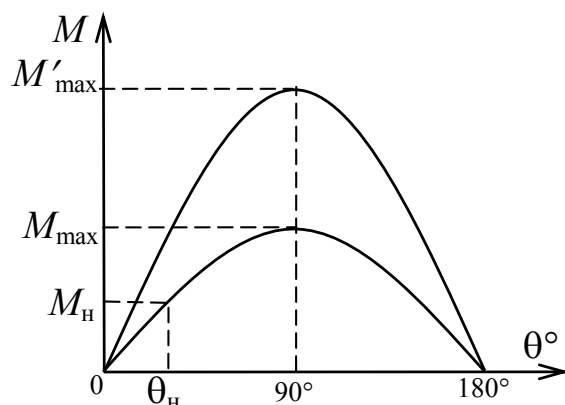


Рис. 13.7. Угловая характеристика СД

Обычно при номинальной нагрузке $\theta_{\text{ном}} = 20-30^\circ$, а коэффициент перегрузочной способности $K_M = \frac{M_{\max}}{M_H} = \frac{1}{\sin \theta} = 2-3$. Следовательно, в соответствии с уравнением (13.3) можно регулировать максимальный момент M_{\max} путем изменения U_c , тем самым изменяя θ .

И если изменять ток возбуждения I_B обмотки ротора, то изменится E_0 , что приведет к изменению M_{\max} .

2. Механическая характеристика $\Omega = f(M)$. Так как $\Omega_0 = \text{const}$ и не зависит от момента M , то механическая характеристика абсолютно жесткая (прямая, параллельная оси M) в пределах $M = 0-M_{\max}$ (рис. 13.8).

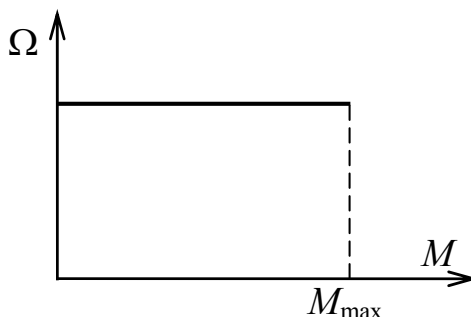


Рис. 13.8. Механическая характеристика

13.6. Пуск синхронного двигателя

Для разгона СД до Ω_0 раньше использовали специальный разгонный двигатель. Это было неудобно и сложно, что сдерживало применение СД.

Современные СД почти исключительно запускаются способом *асинхронного пуска*, при котором разгонный двигатель *не требуется*.

Для самостоятельного разгона в роторе СД укладывается короткозамкнутая пусковая обмотка по типу *белчьей клетки* (рис. 13.9). Для того чтобы в обмотке возбуждения ОВ индуктированная большая ЭДС во время пуска не повредила изоляции, ее на время пуска замыкают на пусковое сопротивление R_{Π} в 10–15 раз больше сопротивления обмотки возбуждения ОВ. Ротор разгоняется, как в АД, до скольжения $S = \frac{n - n_0}{n} 100 \% = 0,05 \%$. После этого ОВ переключается на постоянное напряжение $U_{\text{в}}$. Двигатель втягивается в синхронизм (после нескольких качаний ротора).

Синхронные двигатели изготавливаются на мощности до 22000 кВт различного исполнения.

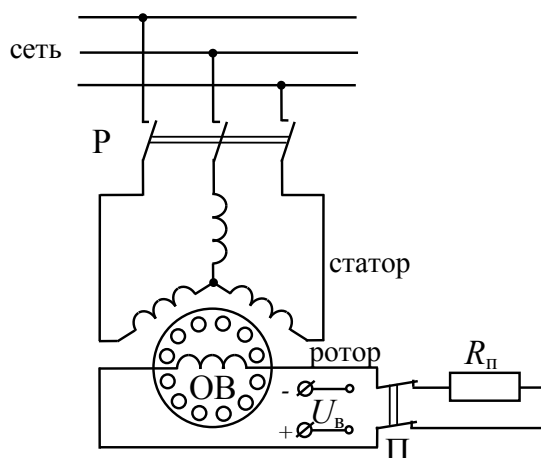


Рис. 13.9. Схема пуска СД

Использование

Изменяя $I_{\text{в}}$, можно изменять $\cos \phi$ двигателя и можно довести $\cos \phi = 1$ и даже с *опережающим* током. На установках большой и средней мощности – *выгодно*. Они могут даже компенсировать $\cos \phi$ асинхронных двигателей (насосы, компрессоры, вентиляторы и т. п. – где не требуется реверс и регулирование скорости вращения).

Вопросы

13.1. Общие сведения

1. Что такое синхронные машины? Почему они называются синхронными?
2. Где используются синхронные генераторы?
3. Где применяют синхронные двигатели?

13.2. Принцип действия синхронного генератора

1. Назначение синхронного генератора.
2. Условная схема конструкции генератора.
3. Конструкция сердечника статора (якоря).
4. Обмотка статора (якоря).
5. Реальная конструкция ротора и обмотки ротора.
6. Питание обмотки ротора.
7. Какие двигатели вращают ротор на электростанции?
8. ЭДС обмотки каждой фазы якоря (статора).
9. Реакция якоря на Φ_0 при различных характерах нагрузки.

13.3. Основные характеристики синхронных генераторов

1. Характеристика холостого хода $E_0 = f(I_v)$.
2. Внешняя характеристика $U = f(I)$ при $\varphi = 0$, $\varphi > 0$, $\varphi < 0$.
3. Регулировочная характеристика $I_v = f(I)$ при $\varphi = 0$, $\varphi > 0$, $\varphi < 0$.

13.4. Принцип действия синхронного двигателя

1. Как возникает вращающий момент M ?
2. Запуск синхронного двигателя и «ввод» его в синхронизм.
3. В каком случае работающий синхронный двигатель «выпадет» из синхронизма и остановится?

13.5. Характеристики синхронного двигателя

1. Угловая характеристика $M = M_{\max} \sin \theta$ (пример для двух значений M_{\max} , M'_{\max}).
2. Механическая характеристика $\Omega = f(M)$.

13.6. Пуск синхронного двигателя СД

1. Асинхронный пуск СД (схема пуска).
2. Использование СД.

ГЛАВА 14 ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

14.1. Общие сведения

До сих пор мы рассматривали устройства получения и потребления электрической энергии в самом общем виде, не конкретизируя области применения электрической энергии.

В этой главе мы рассмотрим обобщенные задачи применения электрической энергии *для привода в движение* различных простейших бытовых и сложных промышленных механизмов и производственных машин.

Электропривод – это совокупность различных устройств – двигателей, передаточных механизмов механической энергии к рабочей машине (редукторов, трансмиссий), устройства управления процессом работы привода.

Раньше широко применяли *групповые приводы*, когда от одного двигателя приводили в движение несколько рабочих механизмов и машин через трансмиссионные передачи (ременные передачи). Но механическая передача движения от первичного двигателя к станкам через трансмиссию, а затем через другие ременные, зубчатые передачи, через механические подключающие к трансмиссии устройства была неизбежно связана с *большими потерями энергии* (нередко до 50 %). К тому же эти передачи занимали *много места*, а также были неудобны в управлении. Поэтому теперь такой групповой электропривод не применяется, но его еще можно увидеть на старых предприятиях.

В настоящее время используются одиночные или многодвигательные приводы. *Одиночный привод* – это когда *один двигатель* приводит в движение *одну рабочую машину* – вентилятор, компрессор, сверлильный станок, бытовые механизмы и т. д.

Многодвигательный привод – это когда привод имеет несколько двигателей, каждый из которых приводит в движение определенный механизм сложной производственной машины – сложные металлорежущие станки, прокатные станы и т. п.

Одиночные и особенно многодвигательные приводы обладают *хорошими возможностями* для автоматизации производственных процессов, так как управление осуществляется путем соответствующего изменения электрической энергии, воздействующей на производственный процесс. А это значит, что *сложный многодвигательный*

привод можно автоматизировать при помощи *микропроцессорной системы управления*.

Автоматическое управление электроприводами позволяет увеличить производительность промышленной установки, улучшить качество выпускаемой продукции, улучшить условия труда рабочих.

14.2. Выбор типа электродвигателей

Двигатель должен обеспечить *выполнение требований технологического процесса* к электроприводу производственного механизма: надежность работы привода; *тип двигателя* (его конструкция) должен соответствовать условиям окружающей среды; должен соответствовать заданному диапазону регулирования скорости привода; стабильности скорости привода; условий пуска, торможения и ряда других специфических требований; а также снижения затрат на установку и эксплуатацию.

При выборе двигателя необходимо учитывать конструктивное исполнение с учетом окружающей среды. Например, химостойкие – для химической среды, для сырых помещений – влагостойкие, для взрывоопасных условий – взрывозащищенные двигатели со специальными кожухами и т. д.

Но защищенные двигатели *хуже охлаждаются*, следовательно, больше перегреваются. Поэтому на вал закрытых двигателей устанавливают вентилятор под защитным кожухом для улучшения охлаждения обмоток.

Но необоснованное использование двигателя с защитными устройствами *удорожает* привод.

Конструктивно двигатели выпускаются промышленностью различной модификации по способу монтажа: с горизонтальным валом, с вертикальным валом.

Там, где можно использовать *асинхронный двигатель* с короткозамкнутым ротором, надо выбирать его, так как он самый дешевый и самый надежный двигатель. Если обычный асинхронный двигатель с короткозамкнутой обмоткой не устраивает по условиям пуска, необходимо проверить возможность использования асинхронного двигателя с улучшенными пусковыми свойствами.

В приводах механизмов с большой частотой включений и реверса выбирают асинхронные двигатели с *контактными* кольцами.

Для *нерегулируемых приводов* средней и большой мощности (компрессоры, мощные центробежные насосы и т. п.) используют синхронные электродвигатели.

Двигатели *постоянного* тока независимого возбуждения используют в тех электроприводах, в которых *требуется плавное* регулирование частоты вращения в больших пределах, а также в тех случаях, когда необходимо *работать с малыми скоростями*. Такие двигатели используют и в системах Г–Д на прокатных станах, и в других ответственных приводах, где требуются плавный пуск, плавное торможение и регулирование частоты и момента вращения.

Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения часто используются на транспорте и в подъемно-транспортных механизмах.

Правильный выбор двигателя по мощности обеспечит высокий КПД привода и коэффициент мощности.

Если выбрать двигатель завышенной мощности, то это вызовет увеличение стоимости, снижение КПД и коэффициента мощности.

Если выбрать двигатель недостаточной мощности, то это приведет к нарушению нормальной работы привода, авариям и сокращению срока службы привода.

Допустимая мощность, развиваемая двигателем при его работе под нагрузкой, ограничивается нагревом обмоток. Перегрев двигателя (даже кратковременный) вызывает ускоренное старение изоляции и сокращение срока работы двигателя. Нагрев изоляции обмоток машин выше предельной температуры, определяемой ГОСТом, недопустим.

Основными исходными данными при выборе номинальной мощности двигателя являются:

- 1) моменты нагрузки, приложенные к валу двигателя;
- 2) продолжительность действия этих моментов;
- 3) требуемые скорости и ускорения рабочего органа производственного механизма.

Выбор мощности двигателя усложняется тем, что момент M , развиваемый двигателем в неустановившемся режиме работы, определяется статическим моментом M_c и динамическим моментом

$$M_d = J \frac{d\Omega}{dt}, \text{ т. е. } M = M_c + M_d. \text{ Динамический момент } M_d, \text{ зависящий}$$

от суммарного момента инерции привода, может, при определенных условиях, превышать статический момент $M_d > M_c$ (например, в приводах мельниц и дробилок топлива тепловых электростанций).

Поэтому динамический момент M_d играет существенную роль при выборе мощности двигателя.

При выборе двигателя по мощности учитывают также режимы работы двигателя:

1. Продолжительный режим. В этом режиме двигатель работает в течение длительного времени при мощности $P = P_{\text{ном}}$.

Наибольшее число двигателей выпускается для данного режима.

2. Кратковременный режим. На щитке двигателя, работающего в этом режиме, указывается мощность $P_{\text{ном}}$, которую он может развивать в течение определенного времени $t_{\text{раб}}$. После работы в течение этого времени (например, $t_{\text{раб}} = 10$ мин) двигатель должен охладиться так, чтобы к началу нового цикла работы он полностью охладился.

Такой режим могут иметь двигатели приводов разводных мостов, шлюзовых затворов, зажимных приспособлений металлорежущих станков и т. д. Двигатель выбирают так, чтобы $P_{\text{ном}} \geq P$, и время его работы было равно или меньше указанного на щитке.

3. Повторно-кратковременный режим. В этом режиме двигатели могут работать при мощности, не превосходящей указанную на щитке номинальную $P_{\text{ном}}$ при указанной на щитке продолжительности включения ПВ. Она равна выраженному в процентах отношению суммы рабочего времени $t_{\text{раб}}$ к времени цикла $t_{\text{ц}}$, равного сумме рабочего времени и времени паузы, т. е. $\text{ПВ} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} 100 \%$.

Двигатели для повторно-кратковременной работы на кранах, лифтах, подъемниках и т. п., выпускаются промышленностью с различными номинальными мощностями для стандартных значений $\text{ПВ} = 15, 25, 40, 60 \%$.

14.3. Аппаратура управления и защиты

Для управления различными электроприводами и защиты их от нарушения нормальных режимов разработано и изготавливается промышленностью большое количество различной аппаратуры.

1. Для ручного включения и управления используются: рубильники с мгновенным отключением (с пружиной) и дугогасительной решеткой; пакетные выключатели; реостаты для пуска и регулирования двигателей, контроллеры – для включений и переключений рези-

сторков при пуске, регулировании и изменения направления двигателей. В отличие от многополюсного рубильника контроллер замыкает и размыкает разные цепи не одновременно, а в установленной последовательности.

2. Для защиты различных электроустановок от токов короткого замыкания используют плавкие предохранители, в которых при коротких замыканиях перегорает (расплавляется) специальная вставка из меди ($\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), свинец ($\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$) и др.

3. Контактторы – аппараты для включения и отключения цепей переменного и постоянного тока с напряжением до 1000 В. От коротких замыканий и перегрузок контакторы не защищают. Поэтому они должны работать совместно с устройствами защиты.

Контакторы работают при напряжениях $(0,85\text{--}1,05)U_{\text{ном}}$. Так рассчитана система пружин и электромагнита, который держит контакты во включенном состоянии. При снижении напряжения до $(0,5\text{--}0,6)U_{\text{ном}}$ электромагнит «отпадает» и размыкает контакты, отключая двигатель, или другую установку. Управление электромагнитом контактора осуществляют при помощи кнопок «пуск» и «стоп».

Контакторы служат для замыкания и размыкания силовых электрических цепей и широко используются в схемах управления электроприводами. Управление контакторами осуществляют автоматически или с помощью ручных командных устройств дистанционно.

В промышленности используется огромное количество разнообразных электроприводов. Для управления этими электроприводами промышленностью выпускаются разнообразные конструкции контакторов, возможности и характеристики которых можно найти в специальных справочниках.

4. Электромагнитные реле – это аппараты на меньшие токи, работающие не в рабочих цепях, а в цепях управления при невысоких напряжениях. Их контакты управления просты, а дугогасительные устройства отсутствуют. Так же, как и у контакторов, в реле контакты замыкаются и размыкаются при помощи электромагнита дистанционно. Таким образом, и контакторы, и реле по принципу действия однотипны, но конструктивно многообразны – в зависимости от назначения, от конкретного применения.

Любой контактор и любое электромагнитное реле состоят из электромагнита и группы контактов, которые замыкаются или размыкаются при помощи электромагнита. На рис. 14.1 приведена простейшая конструкция электромагнитного реле, поясняющая принцип действия таких аппаратов.

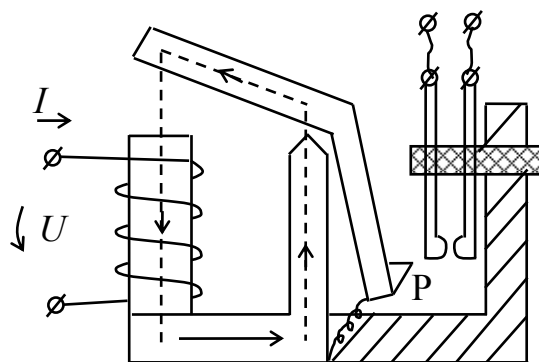


Рис. 14.1. Схема конструкции электромагнитного реле

На рис. 14.1 приведена схема электромагнита с подвижным якорем. Сердечник электромагнита, на который намотана обмотка управления, замыкается ярмом и подвижным якорем, имеющими хорошую магнитную проницаемость. При подключении к обмотке электромагнитного тока I в обмотке возникает магнитный поток Φ , замыкающийся по контуру сердечник, ярмо, подвижный якорь. Магнитный поток Φ притягивает подвижный якорь к сердечнику, в результате чего рычаг P перемещается в пространстве, нажимая на контакты контактной группы. В результате этого контакты замыкаются, совершая управляющие действия.

При отключении тока I в обмотке реле магнитный поток Φ исчезает. Подвижный ПР якорь под действием возвратной пружины возвращается в исходное (отключенное) состояние, а контакты под воздействием упругих свойств контактных пружин расходятся, разрывая электрическую цепь.

Таким образом, происходит полный цикл управления с помощью электромагнитного реле.

14.4. Обозначения отдельных элементов аппаратуры управления

Ранее мы обозначили электропривод как совокупность различных устройств: двигателей, передаточных механизмов (редукторов), устройств управления и защиты.

Для должного понимания работы всего электропривода необходимо все элементы привода рассматривать во всеобщей связи в пространстве и во времени. Для этого каждый элемент имеет свое обозначение на схемах и свои правила включения в схему, и правила функционирования.

Ранее мы уже использовали различные обозначения в схемах замещения – источники, приемники, резисторы, индуктивности, емкости, двигатели и т. д. А в схемах электроприводов важную роль играют аппараты пуска, регулирования, защиты и т. д.

Поэтому необходимо познакомиться с обозначениями элементов аппаратуры управления несложных электроприводов.

	обмотка реле, контактора
Контакты реле, контактора:	
	замыкающий контакт
	размыкающий контакт
	замыкающий контакт с выдержкой времени
	размыкающий контакт с выдержкой времени
	нагревательный элемент температурного реле
	температурное реле (с нагревателем)
	замыкающий контакт температурного реле с ручным возвратом
	размыкающий контакт температурного реле с ручным возвратом
	кнопка с самовозвратом и замыкающим контактом
	кнопка с самовозвратом и размыкающим контактом
	переключающий контакт
	плавкий предохранитель
	лампа сигнальная
	выключатель трехполюсный

14.5. Примеры схем электропривода

Схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором приведена на рис. 14.2. Схема предназначена для пуска и останова двигателя. В схеме предусмотрена защита от максимальных токов в каждой фазе в виде плавких предохранителей, а также от перегрева двигателя установлены температурные реле (часто называют «термореле») 1РТ и 2РТ.

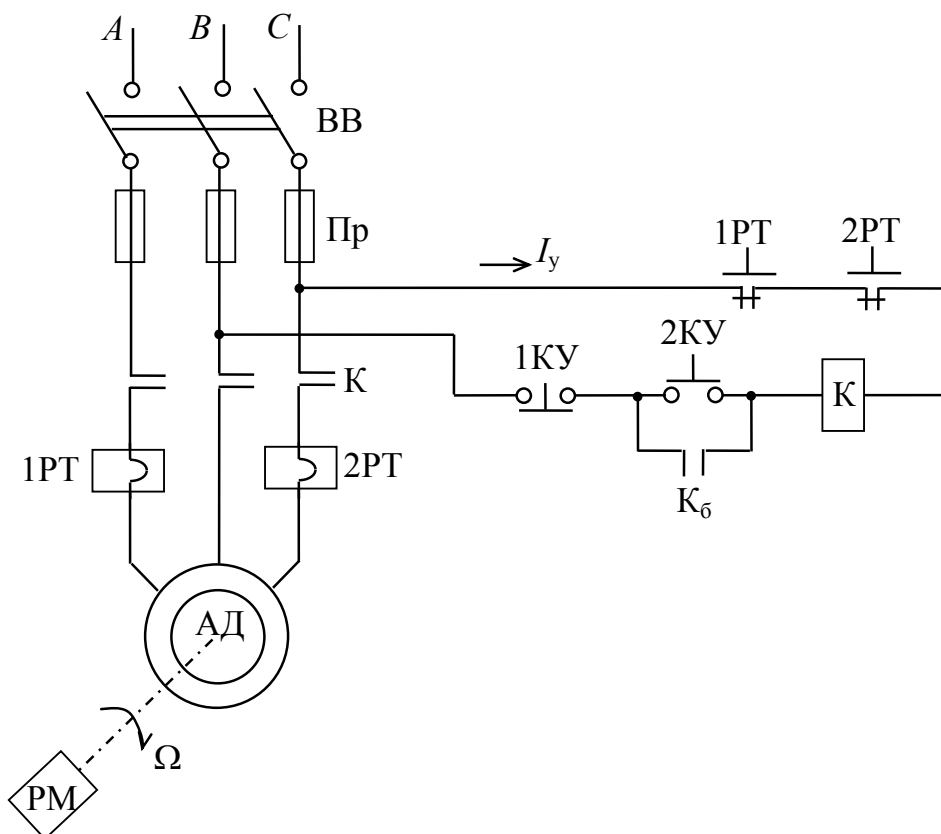


Рис. 14.2. Схема управления асинхронным двигателем

Асинхронный двигатель питается от трехфазной сети. В невключенном состоянии рубильник ВВ разомкнут, контакты термореле 1РТ и 2РТ замкнуты, кнопка управления 1КУ замкнута, 2КУ разомкнута и обмотка (катушка) контактора К обесточена. Следовательно, контакты контактора К в силовой цепи асинхронного двигателя АД разомкнуты. АД неподвижен.

При включении рубильника ВВ трехфазное напряжение сети подключается к цепи управления и к силовым контактам К. В цепи управления кнопка 2КУ всегда нормально разомкнута. Поэтому контактор К не может включиться.

При нажатии на кнопку 2КУ замыкается цепь в контуре обмотки контактора К и через обмотку протекает ток управления I_y . Контактор К включается, замыкает свои силовые контакты в цепи АД и становится на самоблокировку при помощи своего контакта K_6 . После возврата 2КУ в свое незамкнутое состояние обмотка контактора К питается через свой блокировочный контакт K_6 .

При перегреве двигателя срабатывает термореле 1РТ (2РТ) и своим контактом разрывает цепь питания контактора К. Контактор К отключается и обесточивает двигатель.

Если же *при нормальной работе* двигателя необходимо его остановить, то нажатием на кнопку 1КУ разрывают цепь питания контактора К, который отключается и обесточивает двигатель.

Мы рассмотрели схему управления простейшего электропривода, выполняющую задачи пуска и останова асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, а также защиты от больших токов и от перегрева двигателя.

Для осуществления реверса двигателя в схему на рис. 14.2 добавим в цепь управления еще один контактор с дополнительными кнопками управления и силовыми контактами Н (назад), как показано на рис. 14.3.

В неключенном состоянии рубильник ВВ разомкнут, контакты термореле 1РТ и 2РТ замкнуты, кнопки управления 1КУ, 2КУ-2, 3КУ-1 замкнуты, а 2КУ-1 и 3КУ-2 разомкнуты. Катушки контакторов КВ и КН обесточены.

При включении рубильника ВВ трехфазное напряжение сети подключается к цепи управления и к силовым контактам контакторов КВ и КН. Однако обмотки контакторов КВ и КН обесточены, их силовые контакты не замкнуты и ротор АД неподвижен.

При необходимости включения АД «вперед» со скоростью Ω_B нажимают на 2КУ. При этом замыкается контакт 2КУ-1 и через нормально замкнутые контакты 1КУ, 3КУ-1, 2РТ, 1РТ в обмотку контактора «вперед» КВ посылается ток включения КВ. Силовые контакты КВ замыкаются и подают энергию в статор АД. Вращающееся магнитное поле статора увлекает ротор и раскручивает рабочую машину РМ «вперед». Своим замыкающим контактом КВ шунтирует кнопку 2КУ-1 и становится на самоблокировку. Кнопка 2КУ-1 теперь не влияет на работу КВ и может быть разомкнута.

А чтобы во время включенного состояния контактора КВ не мог включиться контактор «назад» КН, цепь его обмотки разорвана разомкнувшимся контактом КВ. При этом АД питается через замкнутые силовые контакты КВ, т. е. на АД поступает напряжение U_A , U_B , U_C .

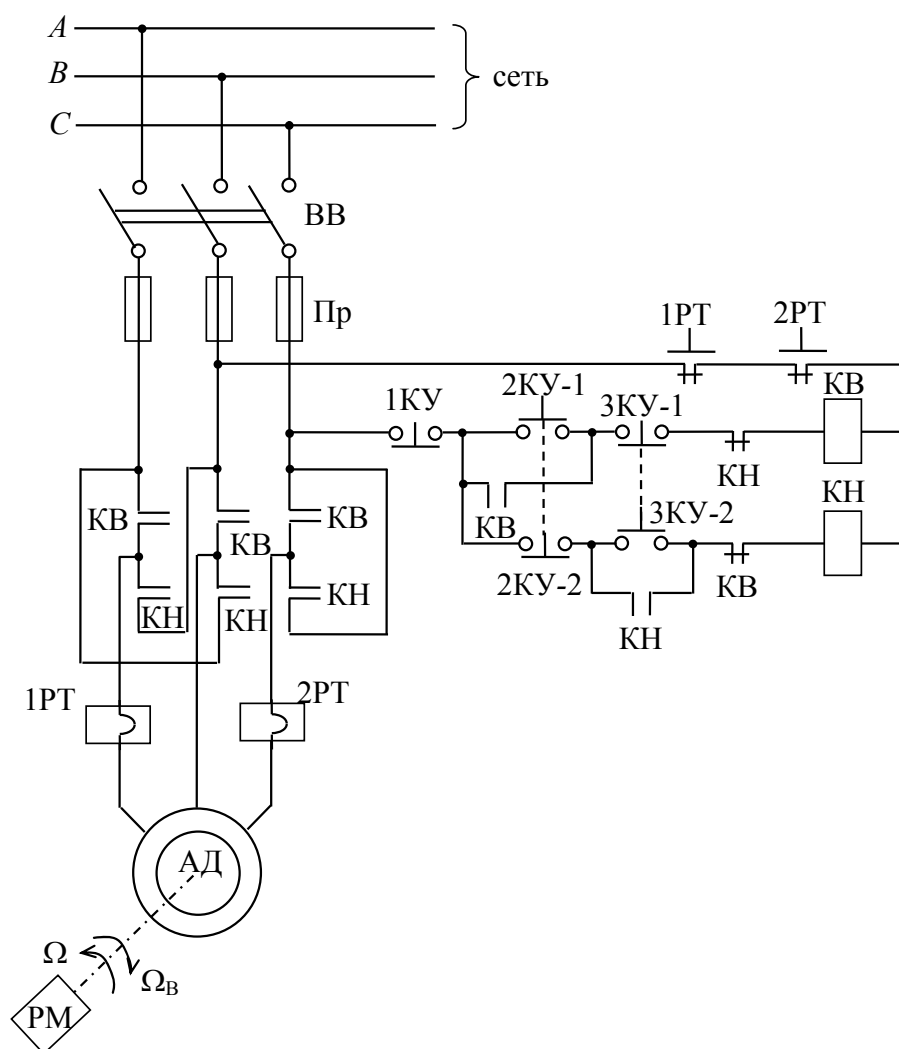


Рис. 14.3. Схема управления реверсивным асинхронным двигателем

Для остановки двигателя АД достаточно нажать на кнопку 1КУ. При этом разрывается цепь питания обмотки контакторов, и контактор КВ отключается, силовые контакты КВ разрывают цепь питания АД и двигатель останавливается.

После возврата кнопки 1КУ в исходное (замкнутое) состояние, цепь управления готова к дальнейшему управленческому воздействию, например, для включения АД в обратную сторону вращения АД. Для этого нажимают кнопку 3КУ, в результате чего замыкается контакт 3КУ-2.

В результате этого через нормально замкнутый контакт 2КУ-2, замкнувшийся контакт кнопки 3КУ-2 и нормально замкнутый контакт КВ отключившегося контактора КВ включается контактор «назад» КН и своим контактом КН блокирует кнопку 3КУ-2 (становится на самоблокировку). При этом через силовые контакты КН на двигатель АД поступает напряжение питания – U_B, U_A, U_C . Двигатель начинает вращаться в другую сторону («назад»), т. е. вращать рабочую машину РМ против часовой стрелки.

Если по какой-либо причине двигатель перегреется, нагреется обмотка 1РТ (2РТ) и термореле 1РТ (2РТ) своим контактом разорвет цепь управления, ток в обмотке контактора КН прервется, КН отключится, разорвет цепь питания АД, и двигатель остановится. Все устройства и цепи придут в исходное отключенное состояние.

Остановить двигатель можно также путем нажатия на кнопку 1КУ, контакт которой разорвет цепь управления, что повлечет за собой отключение двигателя.

Реальные схемы реальных электроприводов могут быть во много раз сложнее рассмотренных выше. При необходимости их описания можно найти в соответствующей литературе.

Вопросы

14.1. Общие сведения

1. Назначение электропривода.
2. Из каких основных устройств состоит электропривод?
3. Групповой привод и его недостатки.
4. Одиночный привод и его применение.
5. Многодвигательный привод и его применение.
6. Преимущества одиночного и (особенно) многодвигательного приводов.

14.2. Выбор типа электродвигателей

1. Основные требования технологических процессов к электроприводу производственного механизма.
2. Выбор двигателя с учетом окружающей среды.
3. Выбор двигателя с экономической точки зрения.
4. Где используются синхронные двигатели?
5. Где лучше использовать двигатели постоянного тока ДПТ с независимым возбуждением?
6. Где лучше использовать ДПТ последовательного возбуждения?

7. Выбор двигателя по требуемой мощности.
8. Выбор по мощности с учетом режима работы:
 - а) продолжительный режим;
 - б) кратковременный режим;
 - в) постоянно-кратковременный режим.

14.3. Аппаратура управления и защиты

1. Аппаратура для ручного включения и управления.
2. Аппаратура для защиты от перегрева.
3. Контактторы для включения и отключения электродвигателей.
4. Электромагнитные реле.
5. Устройство контактора и реле.
6. Как работают реле (контакторы)?

14.4. Обозначения отдельных элементов аппаратуры управления

1. Обмотка реле, контактора.
2. Контакты реле и контакторов.
3. Нагревательный элемент температурного реле.
4. Температурное реле с нагревателем.
5. Контакты температурного реле.
6. Кнопки.
7. Плавкий предохранитель.
8. Лампа сигнальная.
9. Выключатель трехполюсный.

14.5. Примеры схем электропривода

1. Схема управления включением, отключением и перегрева асинхронных двигателей.
2. Работа электропривода на рис. 14.2.
3. Схема управления реверсивным асинхронным двигателем рис. 14.3.
4. Работа электропривода на рис. 14.3.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Методика проведения практических занятий

Для лучшего понимания, усвоения и закрепления теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях и при индивидуальных занятиях с учебником, студентам необходимы решения задач, связанных с расчетами и анализом электрических цепей различной сложности и различных назначений.

Только результаты расчетов, анализа электрических цепей и последующие лабораторные исследования цепей и электрических устройств позволят студенту нормально освоить весь объем материала по электротехнике.

С целью обеспечения студентов практическими расчетами различных электрических цепей в учебнике размещено достаточное количество конкретных задач по различным типам электрических цепей.

Для каждого класса цепей: цепей постоянного тока, цепей однофазного синусоидального тока, трехфазных цепей, нелинейных цепей и переходных процессов в учебнике помещены по 27 задач в каждом классе задач. Все задачи в каждом классе задач пронумерованы от 1 до 27. В каждом классе каждая задача «прикреплена» к студенту, преподавателем по списку к номеру задачи. Следовательно, каждый студент решает свою задачу в каждом классе, анализирует результаты расчетов и построенных графиков и характеристик.

На практическом занятии студент по указанию преподавателя делает обстоятельный доклад по решению и анализу своей задачи с пояснениями и построением на доске графиков и характеристик.

Все студенты группы вместе с ним решают «его» задачу в специальной тетради с достаточным количеством листов для всех задач в учебнике.

После решения задачи с докладом выступает со своей задачей следующий по указанию преподавателя студент. Таким образом, у каждого студента в тетради будет записано столько решений по каждому классу задач, сколько будет студентов докладывать на практическом занятии.

Раз в две недели преподаватель собирает тетради и проверяет решения студентов. В журнале у себя преподаватель записывает оценку практической работы каждого студента.

Для заинтересованности студентов в добротном ведении таких тетрадей можно разрешить пользоваться решениями задач в этих тетрадях на экзаменах (после проверки преподавателем содержания тетради).

Примечание. Все решения задач сопровождаются доказательными словесными объяснениями студента: почему студент действует так, почему выбрал этот метод, этот физический закон, эту формулу и т. д.

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

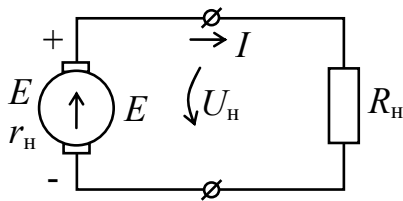
Задача 1

Дана цепь с одним источником и одним приемником R_H .

Известно:

а) когда протекает ток $I = 5 \text{ А}$, то $U_H = 48 \text{ В}$;

б) когда протекает ток $I = 10 \text{ А}$, то $U_H = 46 \text{ В}$.



Необходимо:

а) начертить схему замещения;

б) определить внутреннее сопротивление источника r_n ;

в) определить ЭДС источника E .

Задача 2

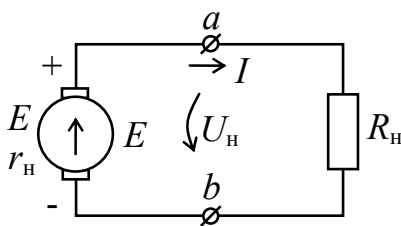
Дана цепь с одним источником и одним приемником R_H .

Известно:

а) $R_H = 19,7 \text{ Ом}$;

б) при этой нагрузке ток $I = 10 \text{ А}$;

в) при $R_H = \infty$ $U_{ab\text{xx}} = 230 \text{ В}$.



Необходимо:

а) начертить схему замещения;

б) определить внутреннее сопротивление источника r_n ;

в) определить ЭДС источника E .

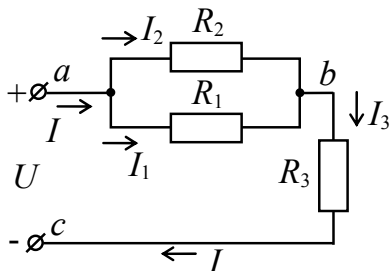
Задача 3

Дан участок цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 150 \text{ В}$;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 150 \text{ Ом}$, $R_3 = 200 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить токи I , I_1 , I_2 , I_3 ;

б) определить напряжения U_{ab} , U_{bc} ;

в) проверить баланс мощностей $P = P_1 + P_2 + P_3$.

Задача 4

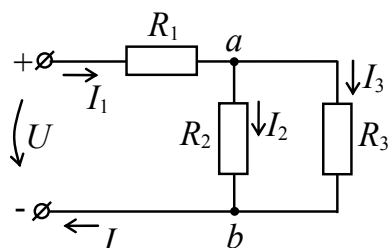
Дан участок цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 100$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 50$ Ом,

$R_3 = 200$ Ом.



Необходимо:

а) определить токи I , I_1 , I_2 , I_3 ;

б) определить напряжение U_{ab} ;

в) определить мощность P_1 в резисторе R_1 .

Задача 5

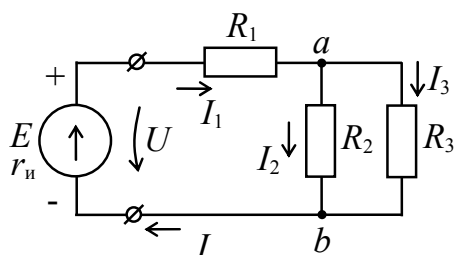
Дана разветвленная цепь с одним источником.

Известно:

а) ЭДС $E = 160$ В;

б) напряжение $U = 150$ В;

в) резисторы $R_1 = 150$ Ом, $R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 200$ Ом.



Необходимо:

а) начертить схему замещения;

б) определить внутреннее сопротивление источника r_n ;

в) определить токи I , I_1 , I_2 , I_3 ;

г) проверить баланс мощностей.

Задача 6

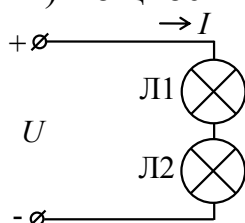
Дан участок цепи с последовательно включенными лампами.

Известно:

а) $U = 200$ В;

б) номинальное напряжение ламп $U_{н1} = U_{н2} = 100$ В;

в) мощность ламп $P_1 = 50$ Вт, $P_2 = 150$ Вт.



Необходимо:

а) определить реальные мощности ламп.

Примечание. Считаем, что сопротивления ламп не зависят от протекающего тока.

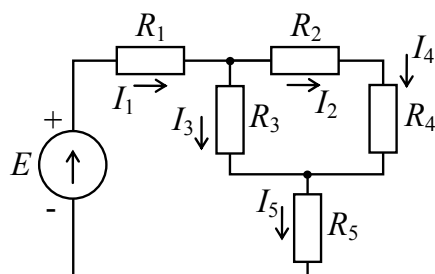
Задача 7

Дана разветвленная электрическая цепь.

Известно:

а) ЭДС;

б) сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 20 \text{ Ом}$, $R_5 = 5 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить токи $I, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$;

б) проверить баланс мощностей, т. е. $P_{\text{и}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$.

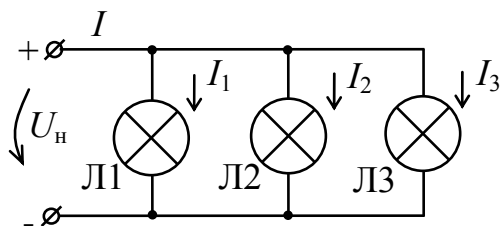
Задача 8

Дан участок цепи с параллельно включенными лампами, у которых одинаковые номинальные напряжения $U_{\text{ном}} = 200 \text{ В}$.

Известно:

а) $U_{\text{н}} = 200 \text{ В}$;

б) номинальные мощности ламп $P_1 = 40 \text{ Вт}$, $P_2 = 60 \text{ Вт}$, $P_3 = 100 \text{ Вт}$.



Необходимо:

а) определить сопротивление каждой лампы;

б) определить токи в лампах;

в) проверить баланс мощностей, т. е. $P = P_1 + P_2 + P_3$.

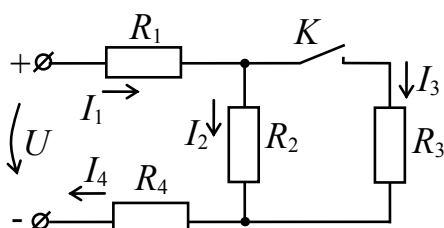
Задача 9

Дан участок электрической цепи.

Известно:

а) $U = 100 \text{ В}$;

б) сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = 5 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить мощности в резисторах P_1, P_2, P_3, P_4 до замыкания и после замыкания ключа K ;

б) определить токи в лампах;

в) проверить баланс мощностей до и после замыкания ключа K .

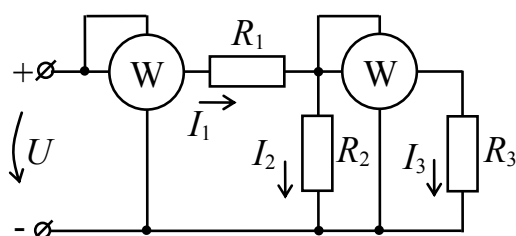
Задача 10

Дана электрическая цепь со смешанным соединением приемников. В цепи включены два ваттметра.

Известно:

а) напряжение $U = 150$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 15$ Ом, $R_3 = 10$ Ом.



Необходимо:

а) определить показания ваттметров;

б) проверить баланс мощностей.

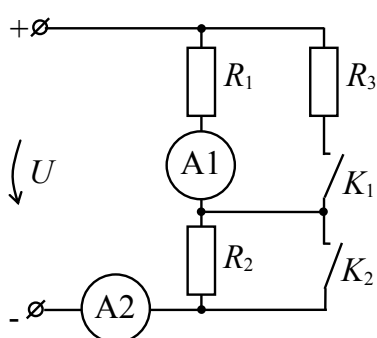
Задача 11

Дан участок цепи с включенными приборами.

Известно:

а) напряжение $U = 100$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 5$ Ом.



Необходимо: определить показания приборов (амперметров):

а) при разомкнутых ключах K_1 и K_2 ;

б) при замкнутом K_1 и разомкнутом K_2 ;

в) при разомкнутом K_1 и замкнутом K_2 ;

г) при замкнутых ключах K_1 и K_2 .

Задача 12

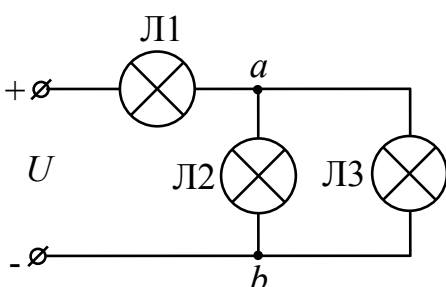
Дана электрическая цепь со смешанным соединением ламп.

Известно:

а) напряжение $U = 200$ В;

б) номинальные мощности ламп $P_1 = P_2 = P_3 = 40$ Вт;

в) номинальное напряжение ламп $U_n = 110$ В.



Необходимо:

а) определить сопротивление ламп $r_{\text{л}}$;

б) рассчитать реальные мощности каждой лампы при таком включении (считаем, что $r_{\text{л}}$ не зависит от тока).

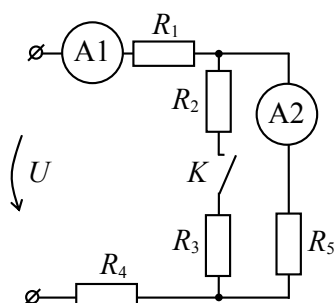
Задача 13

Дан участок сложной электрической цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 100$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = R_2 = R_4 = 10$ Ом, $R_3 = R_5 = 20$ Ом.



Необходимо:

а) определить показания приборов до замыкания ключа K и после замыкания;

б) проверить баланс мощностей после замыкания ключа K , т. е. проверить равенство $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5$.

Задача 14

Дана электрическая цепь постоянного тока с одним источником и одним приемником.

Известно:

а) напряжение на выходе источника в режиме холостого хода $U_{xx} = 250$ В;

б) при подключении нагрузки напряжение $U_H = 242$ В;

в) внутреннее сопротивление источника $r_{вн} = 2,5$ Ом.

Необходимо:

а) начертить схему замещения цепи;

б) определить ток I и сопротивление нагрузки R_H ;

в) проверить баланс мощностей $P = P_{вн} + P_H$.

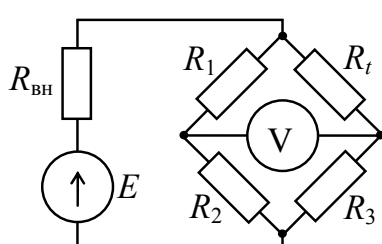
Задача 15

Дана схема замещения электрической измерительной цепи.

Известно:

а) ЭДС источника $E = 20$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 1,5$ Ом, $R_t = 1$ кОм, $r_{вн} = 0,1$ кОм.



Необходимо:

а) определить мощность, расходуемую источником для питания электрической цепи;

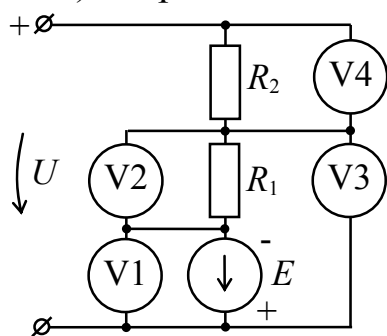
б) определить показание вольтметра (внутреннее сопротивление вольтметра $r_V = \infty$).

Задача 16

Дан участок электрической цепи с дополнительным источником ЭДС E .

Известно:

- а) напряжение $U = 150$ В;
- б) ЭДС дополнительного источника $E = 50$ В, а его сопротивление $r_{\text{вн}} = 10$ Ом;
- в) сопротивления резисторов $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 150$ Ом;
- г) сопротивления вольтметров $r_V = \infty$.



Необходимо:

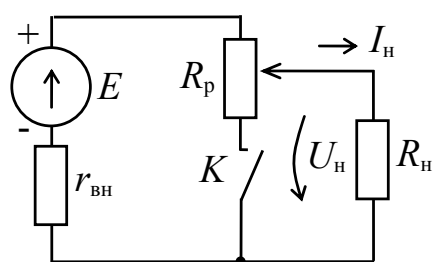
- а) определить показание каждого вольтметра.

Задача 17

Дана электрическая цепь (схема замещения).

Известно:

- а) ЭДС $E = 300$ В;
- б) сопротивления резисторов $R_{\text{н}} = 120$ Ом, $R_{\text{р}} = 0-400$ Ом;
- в) внутреннее сопротивление $r_{\text{вн}} = 10$ Ом.



Необходимо:

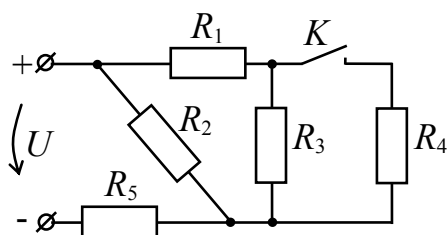
- а) определить, в каких пределах можно изменять ток $I_{\text{н}}$ и напряжение $U_{\text{н}}$ на грузки:
 - 1) при замкнутом ключе K ;
 - 2) при разомкнутом ключе K .

Задача 18

Дан участок электрической цепи.

Известно:

- а) напряжение $U = 50$ В;
- б) сопротивления резисторов $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 5$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 4$ Ом, $R_5 = 2$ Ом.



Необходимо:

а) определить мощности в резисторах R_3 и R_4 ;

1) до замыкания ключа K ;

2) после замыкания ключа K .

Задача 19

Дан участок электрической цепи с переменным резистором R_3 .

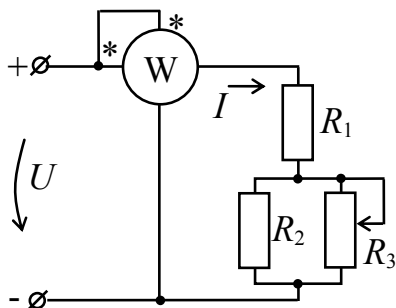
Известно:

а) напряжение $U = 80$ В;

б) сопротивление $R_2 = 5$ Ом;

в) показание ваттметра при одном крайнем положении R_3
 $P_{W\max} = 1280$ Вт;

г) показание при другом крайнем положении R_3 $P_{W\min} = 792,4$ Вт.



Необходимо:

а) определить сопротивления резисторов R_1 и R_3 .

Задача 20

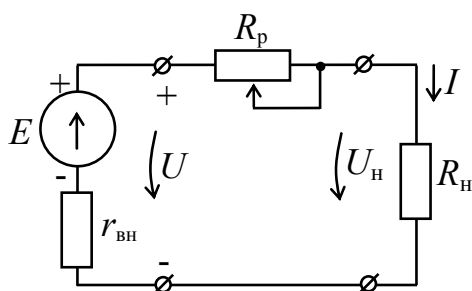
Дана электрическая цепь постоянного тока с регулированием напряжения U_H на нагрузке R_H .

Известно:

а) ЭДС $E = 200$ В;

б) сопротивление $R_H = 90$ Ом;

в) диапазон регулирования напряжения $U_H = 50-180$ В.



Необходимо:

а) определить внутреннее сопротивление $r_{вн}$;

б) рассчитать сопротивление реостата R_p для регулирования U_H в заданном диапазоне;

в) построить внешнюю характеристику $U_H = f(I)$.

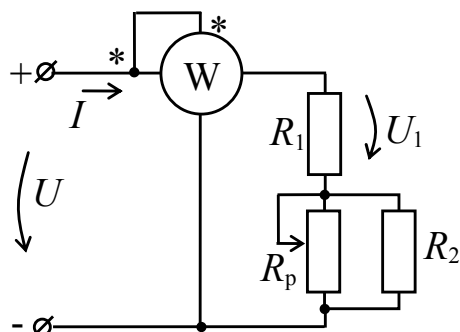
Задача 21

Дан участок электрической цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 100$ В;

б) сопротивление резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_p = 0$ – 20 Ом.



Необходимо:

а) определить максимальное и минимальное показания ваттметра (считать сопротивление токовой обмотки $r_{iW} = 0$, а сопротивление обмотки напряжения $r_{uW} = \infty$);

б) построить внешнюю характеристику для резистора R_1 , т. е. $U_1 = f(I)$.

Задача 22

Дан источник постоянного тока, к которому подключена нагрузка R_H .

Известно:

а) ЭДС источника $E = 300$ В;

б) внутреннее сопротивление источника $r_{BH} = 50$ Ом;

в) сопротивление нагрузки $R_H = 2,5$ кОм;

г) ток нагрузки требуется изменять (регулировать) в пределах $I_H = 10$ – 100 мА.

Необходимо:

а) начертить схему замещения цепи;

б) выбрать регулировочный реостат по сопротивлению и по мощности (чтобы он не сгорел). Это значит рассчитать $R_{p\max}$ и $P_{p\max}$.

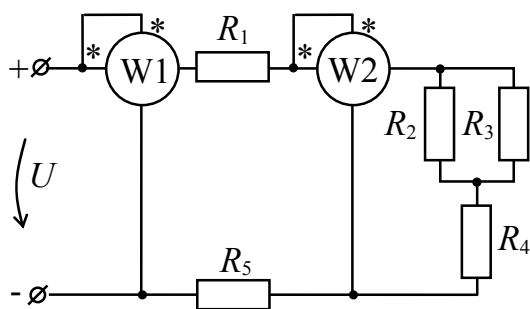
Задача 23

Дан участок электрической цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 60$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = R_3 = 4$ Ом, $R_4 = 3$ Ом, $R_5 = 5$ Ом.



Необходимо:

а) определить показания ваттметров (считать сопротивления ваттметров $r_{iW} = 0$, $r_{uW} = \infty$).

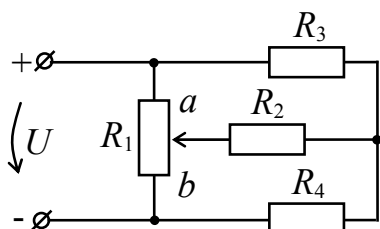
Задача 24

Дан участок электрической цепи.

Известно:

а) напряжение $U = 20$ В;

б) сопротивления резисторов $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 5$ Ом, $R_4 = 10$ Ом.



Необходимо: определить ток в резисторе R_2 при положении движка реостата R_1 :

а) в середине R_1 ;

б) в точке a (вверху R_1);

в) внизу R_1 (в точке b).

Задача 25

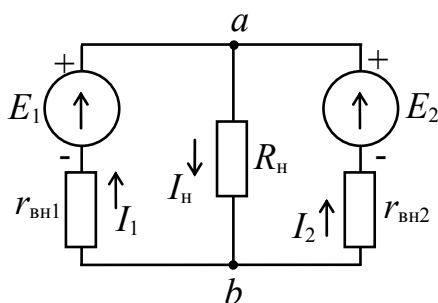
Дана электрическая цепь с двумя источниками ЭДС, работающими на одну нагрузку R_H .

Известно:

а) ЭДС $E_1 = 10$ В;

б) ЭДС $E_2 = 20$ В;

в) сопротивления резисторов $r_{BH1} = 2$ Ом, $r_{BH2} = 3$ Ом, $R_H = 20$ Ом.



Необходимо:

а) определить токи I_1 , I_2 , I_H при помощи законов Кирхгофа;

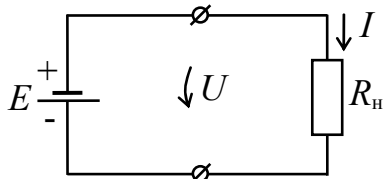
б) проверить баланс мощностей.

Задача 26

Дан источник постоянного тока – аккумуляторная батарея, работающая на R_n .

Известно:

- а) при подключенной к источнику нагрузке $U = 4,5$ В;
- б) при отключенной нагрузке, т. е. в режиме холостого хода, $U_{xx} = 4,8$ В;
- в) сопротивление нагрузки $R_n = 25$ Ом.



Необходимо:

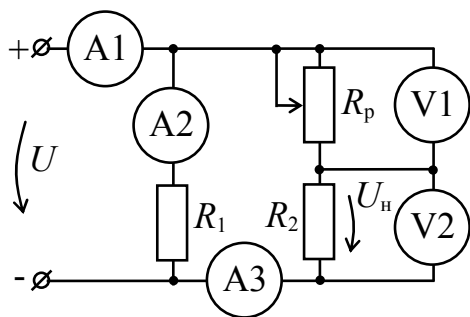
- а) начертить схему замещения электрической цепи;
- б) определить внутреннее сопротивление источника.

Задача 27

Дан участок электрической цепи.

Известно:

- а) напряжение $U = 100$ В;
- б) сопротивления резисторов $R_1 = 40$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_p = 0-40$ Ом.



Необходимо:

- а) определить показания всех приборов при $R_p = 20$ Ом;
- б) построить внешнюю характеристику для нагрузки для $R_n = R_2$ $U_n = f(I_2)$ при изменении $R_p = 0-40$ Ом (считать сопротивления амперметров $r_A \approx 0$, а вольтметров $r_V = \infty$).

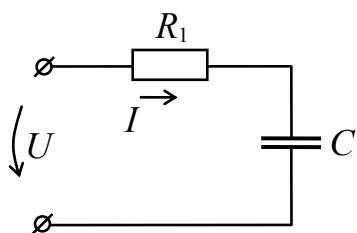
ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (СИНУСОИДАЛЬНОГО)

Задача 1

Дан участок цепи переменного тока.

Известно:

- а) действующее значение переменного напряжения $U = 127$ В;
- б) сопротивление $R = 10$ Ом;
- в) емкость конденсатора $C = 100$ мкФ;
- г) частота $f = 50$ Гц.



Необходимо:

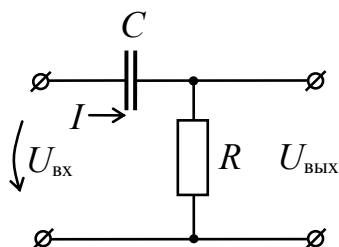
- а) определить сопротивление емкости;
- б) рассчитать действующее значение тока I ;
- в) определить активную P и реактивную Q мощности в этом участке цепи.

Задача 2

Дана простейшая цепь R – C .

Известно:

- а) $U_{\text{ВХ}} = 15$ В – действующее значение;
- б) $R = 20$ Ом – сопротивление резистора;
- в) емкость конденсатора $C = 20$ мкФ.



Необходимо:

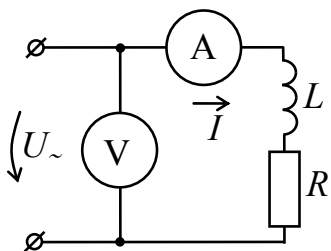
- а) определить $U_{\text{ВЫХ}}$ при частоте тока $f = 100$ Гц;
- б) определить $U_{\text{ВЫХ}}$ при частоте тока $f = 1000$ Гц.

Задача 3

Дан участок цепи синусоидального тока.

Известно:

- а) показание вольтметра $U_{\sim} = 200$ В ($r_V = \infty$);
- б) показание амперметра $I = 5$ А ($r_A = 0$);
- в) индуктивность катушки $L = 0,05$ Гн;
- г) частота $f = 50$ Гц.



Необходимо:

- а) определить сопротивление R ;
- б) определить активную P и реактивную Q мощности в этом участке цепи;
- в) определить сдвиг по фазе φ между U и I .

Задача 4

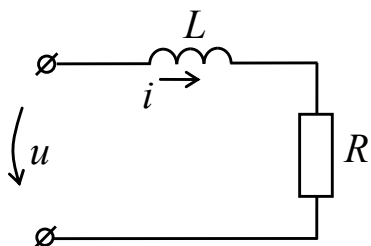
Дан участок цепи.

Известно:

- а) напряжение $U = 127$ В;
- б) сопротивление $R = 12$ Ом;

в) емкость конденсатора $C = 100 \text{ мкФ}$;

г) частота $f = 50 \text{ Гц}$.



Необходимо:

а) определить сопротивление емкости;

б) рассчитать действующее значение тока I ;

в) определить активную P и реактивную Q мощности в этом участке цепи.

Задача 5

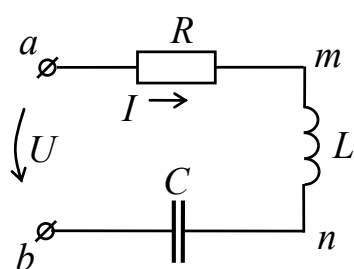
Дана цепь.

Известно:

а) частота тока $f = 500 \text{ Гц}$;

б) напряжения на участках: $U_{am} = 100 \text{ В}$; $U_{mn} = 100 \text{ В}$; $U_{nb} = 50 \text{ В}$;

в) активная мощность $P = 100 \text{ Вт}$.



Необходимо:

а) определить напряжение U_{ab} ;

б) определить сопротивление R ;

в) определить индуктивность катушки L ;

г) определить емкость конденсатора C .

Задача 6

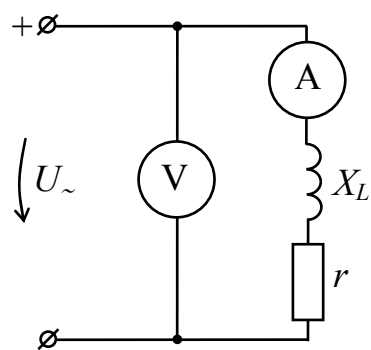
Дан участок цепи.

Известно:

а) показание вольтметра $U_{\sim} = 200 \text{ В}$;

б) показание амперметра $I = 4 \text{ А}$;

в) сопротивление катушки индуктивности $X_L = 30 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить активное сопротивление катушки r ;

б) определить активную мощность P (Вт) и реактивную мощность Q (ВА).

Задача 7

Имеются резистор и качественный конденсатор, соединенные последовательно. Эта цепь подсоединена к сети синусоидального тока.

Известно:

- а) сопротивление резистора $R = 100 \text{ Ом}$;
- б) емкость конденсатора $C = 20 \text{ мкФ}$;
- в) напряжение $u = 180 \sin 314t$.

Необходимо:

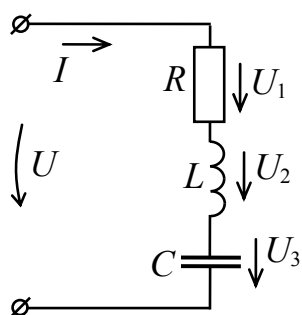
- а) начертить схему замещения;
- б) определить ток I ;
- в) определить активную P , реактивную Q и полную S мощности;
- г) построить векторную диаграмму напряжения и тока.

Задача 8

Дана цепь с последовательно соединенными R – L – C .

Известно:

- а) напряжение $U = 100 \text{ В}$;
- б) сопротивление резистора $R = 20 \text{ Ом}$;
- в) индуктивность катушки $L = 100 \text{ мГн}$;
- г) емкость конденсатора $C = 10 \text{ мкФ}$;
- д) в цепи резонанс напряжений.



Необходимо:

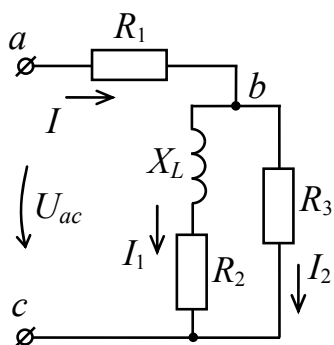
- а) определить ток I ;
- б) определить напряжения U_1, U_2, U_3 ;
- в) определить мощности P, Q .

Задача 9

Дан участок цепи.

Известно:

- а) напряжение $U_{ac} = 127 \text{ В}$;
- б) $R_1 = R_2 = R_3 = X_L = 10 \text{ Ом}$.



Необходимо:

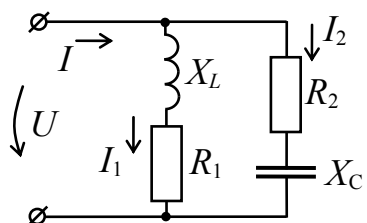
- определить токи I , I_1 , I_2 ;
- определить напряжение между узлами $b-c$, т. е. U_{bc} ;
- определить активную мощность P всей цепи.

Задача 10

Дана цепь с параллельно соединенными приемниками.

Известно:

- напряжение $U = 200$ В;
- сопротивление $X_L = 20$ Ом; $R_1 = 10$ Ом; $R_2 = 20$ Ом; $X_C = 10$ Ом.



Необходимо:

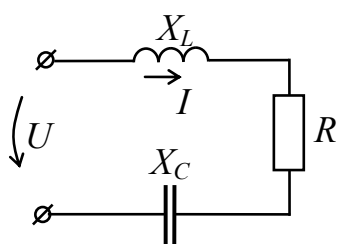
- определить токи I , I_1 , I_2 ;
- построить векторные диаграммы напряжений и токов (напряжения \underline{U} , \underline{U}_L , \underline{U}_{R1} , \underline{U}_{R2} , \underline{U}_C).

Задача 11

Дана цепь с последовательно соединенными элементами $L-R-C$.

Известно:

- напряжение на участках цепи $U = 50$ В; $U_C = 20$ В; $U_R = 30$ В;
- сопротивление $R = 300$ Ом.



Необходимо:

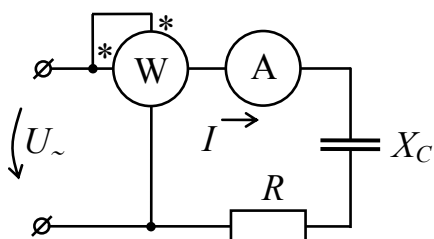
- построить векторную диаграмму;
- определить X_L , X_C .

Задача 12

Дана цепь с последовательно соединенными резистором и конденсатором.

Известно:

- напряжение $U_{\sim} = 220$ В;
- ваттметр показывает $P = 264$ Вт;
- амперметр показывает $I = 8$ А;
- частота $f = 100$ Гц.



Необходимо:

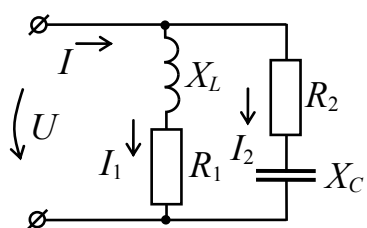
- а) определить сопротивление R ;
- б) определить сопротивление X_C ;
- в) определить емкость C конденсатора (считать внутреннее сопротивление амперметра и токовой обмотки ваттметра $r_A = r_W = 0$, а обмотки напряжения $r_{W_U} = \infty$).

Задача 13

Дана цепь с параллельно соединенными приемниками X_1 – R_1 и X_2 – R_2 .

Известно:

- а) напряжение $U = 220$ В;
- б) $X_L = X_C = R_1 = R_2 = 220$ Ом.



Необходимо:

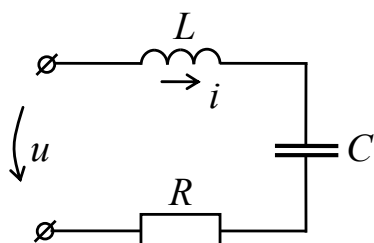
- а) определить токи I, I_1, I_2 ;
- б) построить векторную диаграмму токов и напряжений $\underline{U}_{X1}, \underline{U}_{R1}, \underline{U}_{R2}, \underline{U}_{X2}$.

Задача 14

Дана цепь с последовательно соединенными элементами цепи L – C – R .

Известно:

- а) напряжение на зажимах цепи $u = 141 \sin \omega t$;
- б) частота тока в цепи $f = 50$ Гц;
- в) мощность активная $P = 100$ Вт;
- г) в цепи резонанс напряжений, т. е. $U_C = U_L = 200$ В.



Необходимо:

- а) определить активное сопротивление R ;
- б) определить индуктивность катушки L ;
- в) определить емкость C конденсатора.

Задача 15

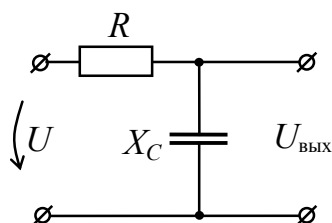
Дана цепь $R-C$, соединенная последовательно.

Известно:

а) мгновенное напряжение на входе $u = 14,1 \sin \omega t$;

б) сопротивление $R = 1,5 \text{ кОм}$;

в) емкость конденсатора $C = 0,1 \text{ мкФ}$.



Необходимо:

а) рассчитать и построить характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(t)$ для значений частоты $0 \leq f \leq 2 \text{ кГц}$.

Задача 16

Дана цепь с последовательно соединенными $R-L-C$. Цепь присоединена к источнику, частоту напряжения в котором можно изменять.

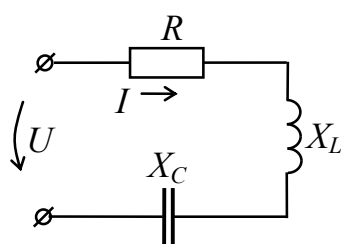
Известно:

а) напряжение $U = 100 \text{ В}$;

б) сопротивление $R = 200 \text{ Ом}$;

в) индуктивность $L = 0,2 \text{ Гн}$;

г) емкость конденсатора $C = 5 \text{ мкФ}$.



Необходимо:

а) определить такую частоту f напряжения, при которой ток в цепи будет

$$I = \frac{U}{R} = 0,5 \text{ А.}$$

Задача 17

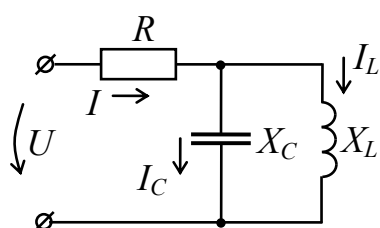
Дана цепь со смешанным соединением элементов цепи $R-C-L$.

Известно:

а) ток $I_C = 12 \text{ А}$;

б) ток $I_L = 8 \text{ А}$;

в) сопротивление $R = 10 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить ток I ;

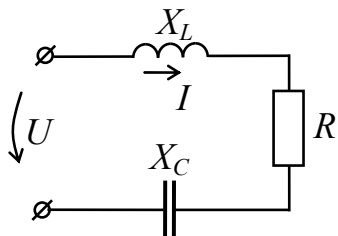
б) определить напряжения U_R ;

в) определить активную мощность P .

Задача 18

Дана цепь с последовательно соединенными элементами L – R – C . Известно:

- а) напряжения на элементах $U_L = 50$ В; $U_R = 30$ В; $U_C = 20$ В;
- б) частота напряжения $f = 1$ Гц;
- в) сопротивление $R = 100$ Ом.



Необходимо:

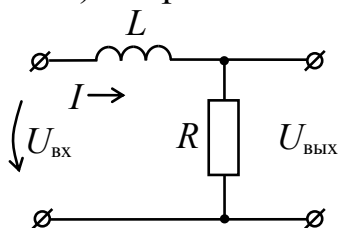
- а) определить ток I в цепи;
- б) определить индуктивность L катушки;
- в) определить емкость C конденсатора.

Задача 19

Дана цепь с последовательно соединенными L – R в функции делителя напряжения.

Известно:

- а) напряжение $U_{\text{вх}} = 20$ В;
- б) индуктивность катушки $L = 0,2$ Гн;
- в) сопротивление $R = 20$ Ом.



Необходимо:

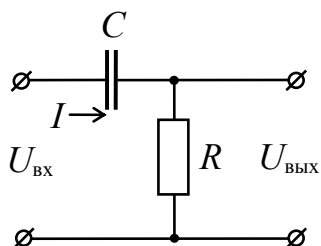
- а) определить $U_{\text{вых}}$ при частоте $f_1 = 100$ Гц;
- б) определить $U_{\text{вых}}$ при частоте $f_2 = 10$ кГц.

Задача 20

Дана цепь с последовательно соединенными C – R в функции делителя напряжения.

Известно:

- а) входное напряжение $U_{\text{вх}} = 20$ В;
- б) емкость конденсатора $C = 0,1$ мкФ;
- в) сопротивление $R = 1$ кОм.



Необходимо:

- а) определить $U_{\text{вых}}$ при частоте $f_1 = 1$ кГц;
- б) определить $U_{\text{вых}}$ при частоте $f_2 = 3$ кГц.

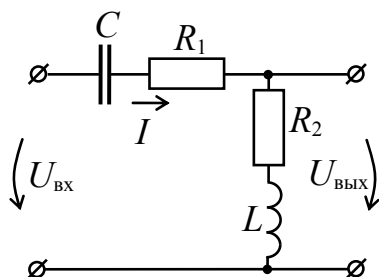
Задача 21

Дана сложная цепь делителя напряжений.

Известно:

а) напряжение $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$;

б) сопротивление элементов цепи: $X_C = 70 \text{ Ом}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$;
 $R_2 = 30 \text{ Ом}$; $X_L = 40 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить ток I ;

б) определить $U_{\text{вых}}$;

в) определить частоту f питающего напряжения (частоту $U_{\text{вх}}$).

Задача 22

Дана простейшая цепь переменного синусоидального тока.

Известно:

а) напряжение $U = 90 \text{ В}$;

б) ток в цепи $I = 5 \text{ А}$;

в) сдвиг по фазе между током и напряжением $\varphi = 60^\circ$.

Необходимо:

а) начертить схему замещения цепи;

б) определить параметры этой схемы: активное сопротивление R , реактивное сопротивление X , полное сопротивление Z .

Задача 23

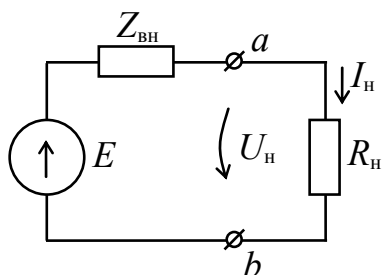
Дана цепь синусоидального тока.

Известно:

а) в режиме холостого хода, т. е. $R_{\text{н}} = \infty$, $U_{\text{абхх}} = 230 \text{ В}$;

б) при $R_{\text{н}} = 19,7 \text{ Ом}$ $I_{\text{н}} = 10 \text{ А}$;

в) $\underline{Z}_{\text{вн}} = R_{\text{вн}} + jX_{\text{вн}}$, $R_{\text{вн}} = 3 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить $X_{\text{вн}}$;

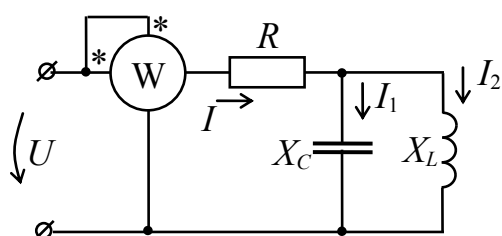
б) определить реактивную мощность Q источника.

Задача 24

Дан участок цепи синусоидального тока.

Известно:

- а) токи $I_1 = 0,5 \text{ A}$; $I_2 = 0,1 \text{ A}$;
- б) сопротивления $R = 100 \text{ Ом}$; $X_C = 200 \text{ Ом}$; $X_L = 100 \text{ Ом}$;
- в) частота $f = 50 \text{ Гц}$.



Необходимо:

- а) определить напряжение U и ток I ;
- б) определить показание ваттметра;
- в) определить, при какой частоте показание ваттметра будет минимальным.

Задача 25

Дана электрическая цепь, в которой резистор и конденсатор соединены параллельно. Цепь подключена к питающей сети.

Известно:

- а) напряжение сети $u = 311 \sin 314t$;
- б) сопротивления резистора $R = 25 \text{ Ом}$;
- в) емкость конденсатора $C = 25 \text{ мкФ}$.

Необходимо:

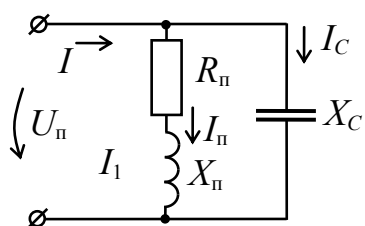
- а) составить схему замещений;
- б) определить токи в ветвях I_1 , I_2 и полный I ;
- в) определить мощности P , Q , S ;
- г) построить векторную диаграмму.

Задача 26

Дана электрическая цепь с приемником $Z_{\text{п}}$. Для повышения $\cos \varphi_{\text{п}}$ к приемнику параллельно подключена емкость C .

Известно:

- а) напряжение $U_{\text{п}} = 120 \text{ В}$;
- б) частота источника питания $f = 50 \text{ Гц}$;
- в) параметры приемника $R_{\text{п}} = 12 \text{ Ом}$; $X_{\text{п}} = 20,8 \text{ Ом}$;
- г) параметр конденсатора компенсации $X_C = 19,5 \text{ Ом}$.



Необходимо:

- а) определить токи I , $I_{\text{п}}$, I_C ;
- б) определить $\cos \varphi_{\text{п}}$ приемника при подключенном X_C и при отсутствии X_C ;
- в) определить мощность P при наличии

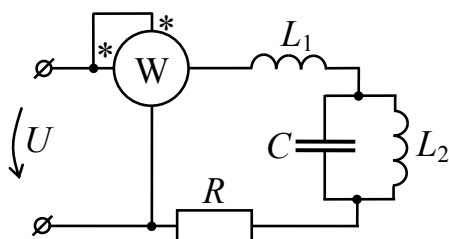
X_C и без X_C .

Задача 27

Дана электрическая цепь.

Известно:

- а) напряжение $U = 100$ В;
- б) частота генератора $f = 0,5$ Гц;
- в) сопротивление $R = 0,5$ кОм;
- г) индуктивности $L_1 = L_2 = 0,2$ Гн;
- д) емкость $C = 2$ мкФ.



Необходимо:

- а) определить показание ваттметра;
- б) определить, при каком значении L_2 ваттметр будет показывать нуль? (Сопротивление токовой обмотки ваттметра $r_{iW} = 0$, а обмотки напряжения $r_{uW} = \infty$.)

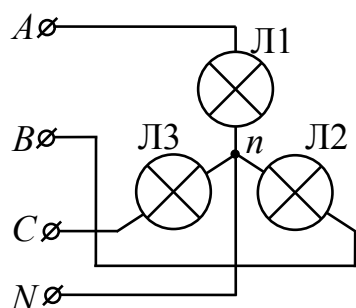
ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

Задача 1

Дана схема включения электрических ламп в трехфазную сеть.

Известно:

- а) все лампы одинаковые;
- б) номинальные напряжения ламп $U_{ном} = 220$ В;
- в) мощность каждой лампы $P = 75$ Вт;
- г) лампы работают в номинальном режиме.



Необходимо:

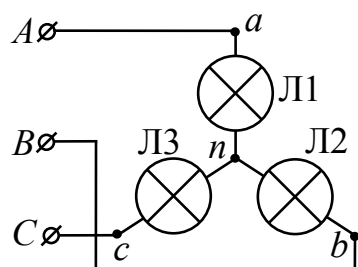
- а) определить линейное напряжение $U_{л} = U_{AB}$;
- б) определить токи, протекающие в лампах;
- в) определить мощности ламп Л1 и Л3, если перегорит лампа Л2.

Задача 2

Дана схема включения электрических ламп в сеть.

Известно:

- а) все лампы одинаковые;
- б) мощность каждой лампы $P = 100 \text{ Вт}$;
- в) лампы работают в номинальном режиме.



Необходимо:

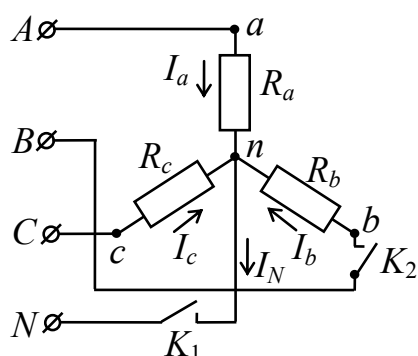
- а) определить токи, протекающие в лампах;
- б) определить линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = U_{AB}$;
- в) определить токи мощности ламп Л1 и Л3, если перегорит лампа Л2.

Задача 3

Дана трехфазная цепь.

Известно:

- а) линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- б) сопротивление фаз приемника $R_a = 22 \text{ Ом}$; $R_b = 44 \text{ Ом}$;
 $R_c = 44 \text{ Ом}$.



Необходимо:

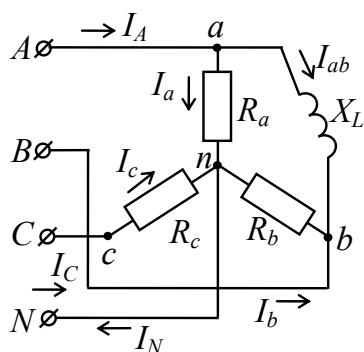
- а) определить фазные токи I_a , I_b , I_c и ток в нейтральном проводе I_N при замкнутых ключах K_1 , K_2 и при разомкнутых ключах K_1 , K_2 .

Задача 4

Дана трехфазная схема включения звездой симметричного приемника и однофазного приемника.

Известно:

- а) токи: $I_{ab} = 10 \text{ А}$; $I_a = 8 \text{ А}$; $I_b = 8 \text{ А}$; $I_c = 8 \text{ А}$;
- б) сопротивления $R_a = R_b = R_c = 15,9 \text{ Ом}$.



Необходимо:

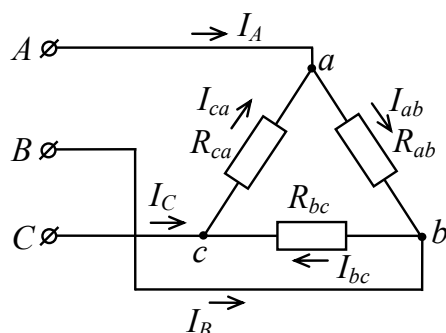
- определить фазные и линейные напряжения U_{ϕ} и $U_{\text{л}}$;
- определить линейные токи I_A , I_B ;
- определить X_L ;
- построить векторную диаграмму.

Задача 5

Дана схема трехфазного приемника, соединенного в схему треугольника.

Известно:

- сопротивления фаз приемника: $R_{ab} = 10 \text{ Ом}$; $R_{bc} = 15 \text{ Ом}$; $R_{ca} = 20 \text{ Ом}$;
- ток $I_{ab} = 22 \text{ А}$.



Необходимо:

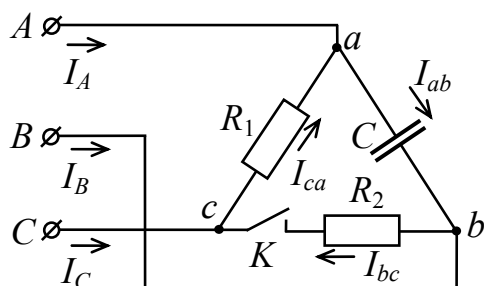
- определить линейное напряжение $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{л}}$;
- определить линейные токи I_A , I_B , I_C ;
- построить векторную диаграмму.

Задача 6

Дана схема трехфазного приемника, соединенного в схему треугольника.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$;
- частота в сети $f = 50 \text{ Гц}$;
- сопротивления $R_1 = R_2 = 50 \text{ Ом}$;
- емкость конденсатора $C = 60 \text{ мкФ}$.



Необходимо:

- определить токи и построить векторные диаграммы при замкнутом ключе K ;
- определить токи и построить векторные диаграммы при разомкнутом ключе K .

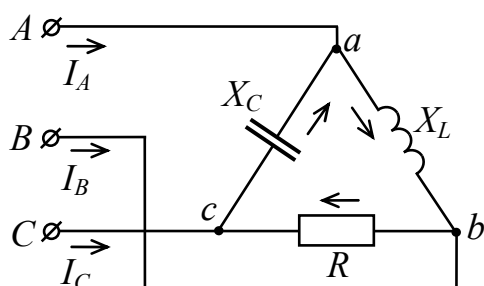
Задача 7

Дана схема несимметричного приемника, включенного в сеть треугольником.

Известно:

а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$;

б) сопротивления: $R = 50 \text{ Ом}$; $X_L = 50 \text{ Ом}$; $X_C = 30 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить токи фазные и линейные;

б) определить активную и реактивную мощности приемника;

в) построить векторную диаграмму.

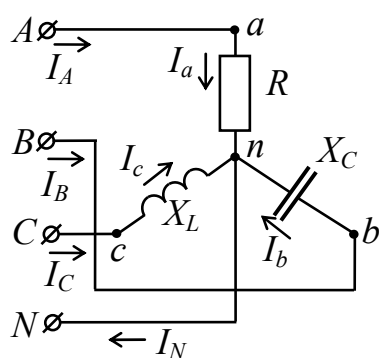
Задача 8

Дана схема несимметричного приемника, включенного в сеть звездой.

Известно:

а) напряжение $U_{AB} = 380 \text{ В}$;

б) сопротивления: $R = 22 \text{ Ом}$; $X_C = 22 \text{ Ом}$; $X_L = 22 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить все фазные и линейные токи;

б) определить ток I_N в нейтрали;

в) построить векторные диаграммы;

г) определить активную мощность в приемнике.

Задача 9

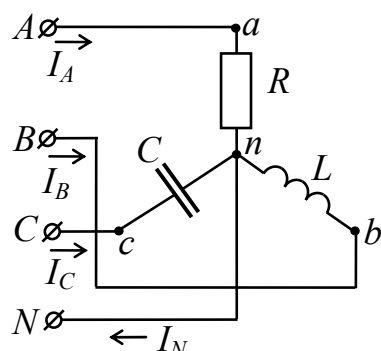
Дана схема несимметричного приемника, включенного в сеть звездой.

Известно:

а) напряжение $U_{AB} = 380 \text{ В}$;

б) сопротивления $R = 110 \text{ Ом}$;

- в) индуктивность $L = 0,9$ Гн;
 г) емкость $C = 68$ мкФ;
 д) частота сети $f = 50$ Гц.



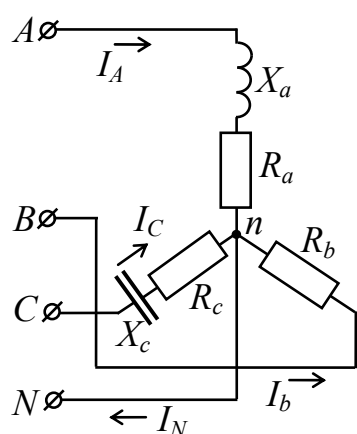
Необходимо:

- а) определить токи I_A , I_B , I_C ;
 б) определить ток в нейтральном проводе I_N ;
 в) построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Задача 10

Несимметричный приемник включен в трехфазную сеть по схеме звезда. Известно:

- а) напряжение линейное $U_{\text{л}} = 220$ В;
 б) сопротивления: $R_a = R_b = R_c = 10$ Ом; $X_a = X_c = 10$ Ом.



Необходимо:

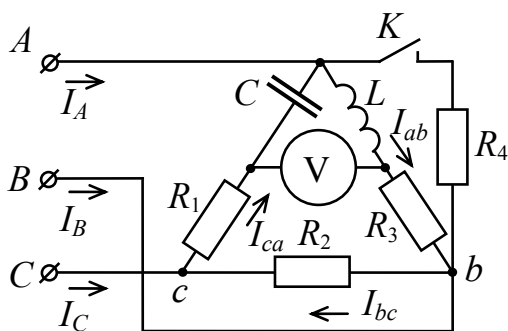
- а) определить токи I_A , I_b , I_c , I_N ;
 б) построить векторную диаграмму;
 в) определить активную мощность P приемника.

Задача 11

Дана комбинированная схема приемника, включенного треугольником в трехфазную сеть.

Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380$ В;
 б) сопротивления: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 80$ Ом;
 в) емкость конденсатора $C = 20$ мкФ;
 г) индуктивность $L = 0,25$ Гн;
 д) частота $f = 50$ Гц.



Необходимо:

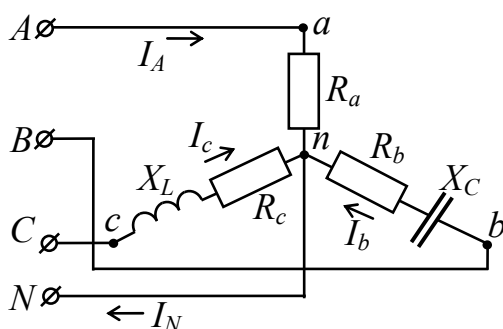
- построить векторную диаграмму и при ее помощи определить показание вольтметра при замкнутом K ;
- определить показание вольтметра при замкнутом ключе K .

Задача 12

Дан несимметричный приемник, включенный звездой.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- токи $I_A = 10 \text{ А}$; $I_B = 5 \text{ А}$; $I_C = 20 \text{ А}$;
- активная мощность всей цепи $P = 4950 \text{ Вт}$;
- $\cos \varphi_a = 1$; $\cos \varphi_b = 0,5$; $\cos \varphi_c = 0,5$.



Необходимо:

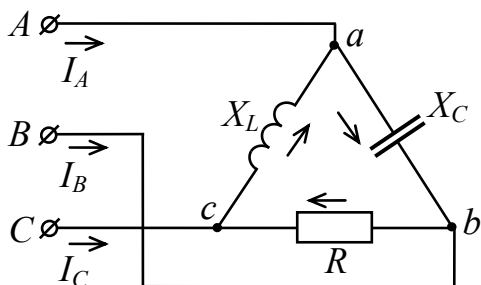
- определить R_b , X_b , R_c , X_c .

Задача 13

Несимметричный приемник, соединенный треугольником, включен в трехфазную сеть.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ В}$;
- сопротивления фаз $X_C = R = X_L = 100 \text{ Ом}$.



Необходимо:

- определить фазные токи I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} ;
- построить векторную диаграмму напряжений и токов;
- определить линейные токи I_A , I_B , I_C .

Задача 14

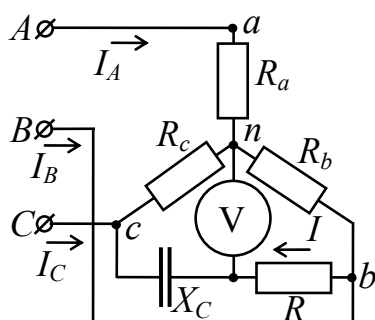
Дана комбинированная электрическая цепь, включенная в трехфазную сеть.

Известно:

а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;

б) резисторы $R_a = R_b = R_c = 22 \text{ Ом}$;

в) $R = X_C = 20 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить показание вольтметра;

б) определить токи I_A, I_B, I_C, I ;

в) построить векторную диаграмму (в масштабе).

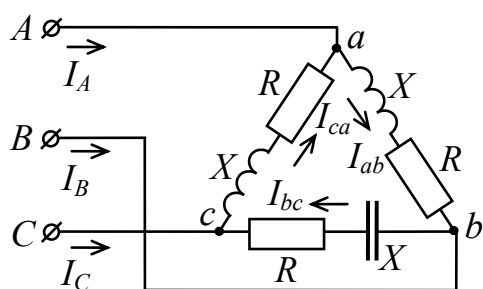
Задача 15

Дан несимметричный приемник, включенный в трехфазную сеть треугольником.

Известно:

а) мгновенное значение линейного напряжения $u_{AB} = 311 \sin \omega t$;

б) сопротивления фаз $R = X = 10 \text{ Ом}$.



Необходимо:

а) определить активную мощность в каждой фазе и всей цепи;

б) определить реактивную мощность каждой фазы и всей цепи.

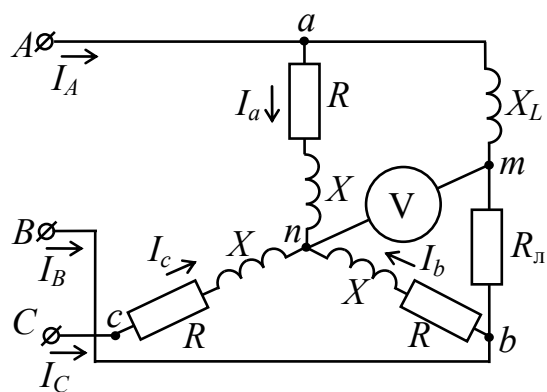
Задача 16

Дана комбинированная схема приемника, включенного в трехфазную сеть звездой (симметричный приемник) и как однофазный приемник.

Известно:

а) линейное мгновенное напряжение $u_{AB} = 282 \sin \omega t$;

б) сопротивления $R = 20 \text{ Ом}$; $X = 20 \text{ Ом}$; $X_L = 18 \text{ Ом}$; $R_L = 18 \text{ Ом}$.



Необходимо:

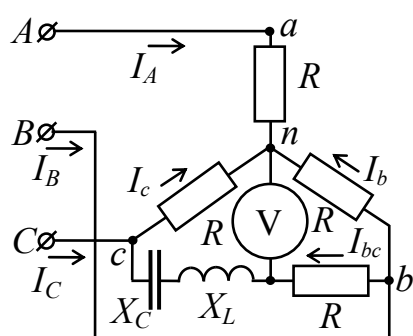
- рассчитать токи;
- построить векторную диаграмму;
- определить показание вольтметра.

Задача 17

Даны однофазный и трехфазный приемники, включенные в электрическую сеть.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$;
- сопротивления $R = X_L = X_C = 22 \text{ Ом}$.



Необходимо:

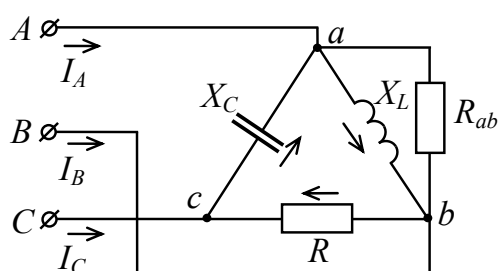
- определить токи;
- построить векторную диаграмму;
- определить показание вольтметра.

Задача 18

Дан трехфазный приемник, включенный в электрическую сеть по схеме треугольника.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$;
- сопротивления $R_{ab} = X_L = 25 \text{ Ом}$; $X_C = 20 \text{ Ом}$; $R = 10 \text{ Ом}$.



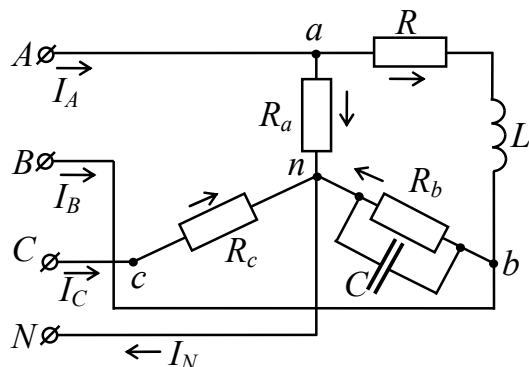
Необходимо:

- определить токи;
- построить векторную диаграмму;
- рассчитать активную мощность.

Задача 19

Дан комбинированный приемник, включенный в трехфазную сеть.
Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- б) частота $f = 50 \text{ Гц}$;
- в) емкость $C = 64 \text{ мкФ}$;
- г) индуктивность $L = 0,16 \text{ Гн}$;
- д) сопротивления $R_a = R_b = R_c = R = 20 \text{ Ом}$.



Необходимо:

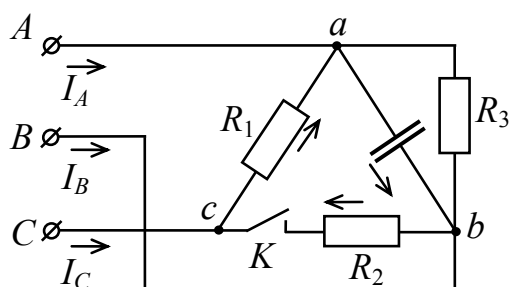
- а) определить активную мощность каждой фазы и всего приемника;
- б) определить реактивную мощность каждой фазы и всего приемника.

Задача 20

Дан приемник, включенный в трехфазную сеть.

Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$;
- б) частота $f = 50 \text{ Гц}$;
- в) емкость $C = 150 \text{ мкФ}$;
- г) сопротивления $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = 30 \text{ Ом}$; $R_3 = 30 \text{ Ом}$.



Необходимо:

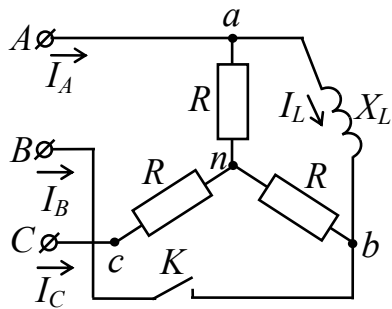
- а) определить токи фазные и линейные при замкнутом ключе K ;
- б) определить токи при разомкнутом ключе K .

Задача 21

Приемник комбинированный включен в трехфазную электрическую сеть.

Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- б) сопротивления $R = 20 \text{ Ом}$; $X_L = 30 \text{ Ом}$.



Необходимо:

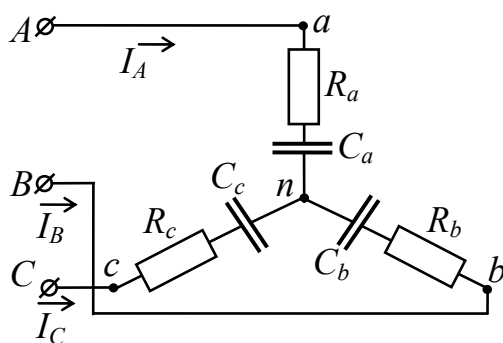
- определить токи во всех участках цепи при замкнутом ключе K ;
- определить токи во всех участках цепи при разомкнутом ключе K .

Задача 22

Симметричный приемник включен в схему звезды и подключен к электрической сети.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- сопротивления $R_a = R_b = R_c = 20 \text{ Ом}$;
- емкости $C_a = C_b = C_c = C = 100 \text{ мкФ}$.



Необходимо:

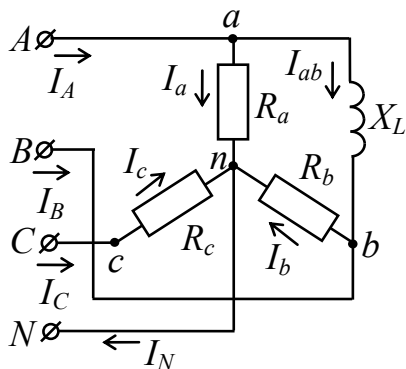
- определить токи;
- определить активную мощность приемника;
- определить реактивную мощность приемника.

Задача 23

Дана схема приемника, подключенного к четырехпроводной электрической сети.

Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- токи $I_{ab} = 6 \text{ А}$, $I_a = 10 \text{ А}$, $I_b = 14 \text{ А}$, $I_c = 5 \text{ А}$.



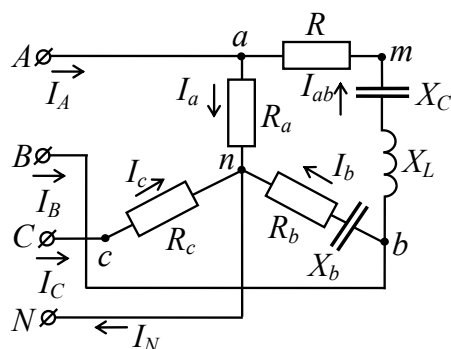
Необходимо:

- определить сопротивления: R_a , R_b , R_c , X_L ;
- определить токи I_A , I_B , I_N (с учетом векторной диаграммы).

Задача 24

Сложная цепь подключена к четырехпроводной электрической сети. Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = U_{AB} = 220 \text{ В}$;
- б) сопротивления $R_a = R_c = 10 \text{ Ом}$; $R_b = R = 15 \text{ Ом}$; $X_b = 10 \text{ Ом}$; $X_L = X_C = 5 \text{ Ом}$.



Необходимо:

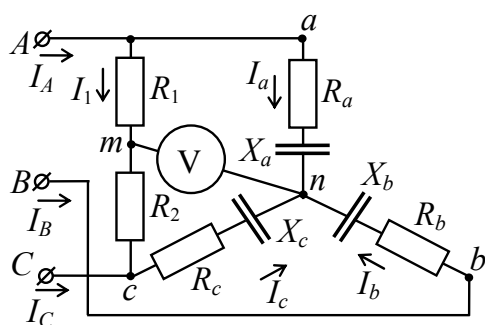
- а) определить токи линейные и фазные;
- б) определить напряжение U_{mn} между точками схемы m и n .

Задача 25

Сложная цепь подключена к трехпроводной электрической трехфазной сети.

Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- б) сопротивления $R_a = R_b = R_c = 20 \text{ Ом}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $X_a = X_b = X_c = 10 \text{ Ом}$.



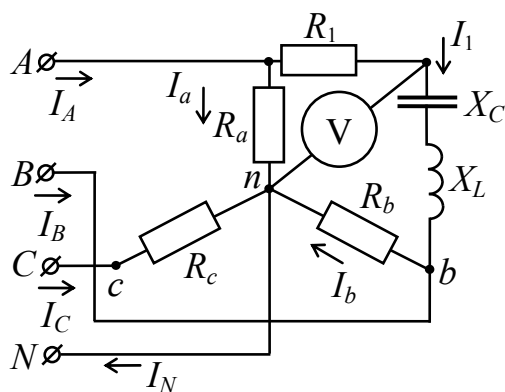
Необходимо:

- а) определить токи линейные и фазные;
- б) определить показание вольтметра U_{mn} .

Задача 26

Сложная цепь подключена к четырехпроводной трехфазной электрической сети. Известно:

- а) линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- б) сопротивления $R_a = R_c = 15 \text{ Ом}$; $R_b = R_1 = 10 \text{ Ом}$; $X_b = 15 \text{ Ом}$; $X_C = X_L = 10 \text{ Ом}$.



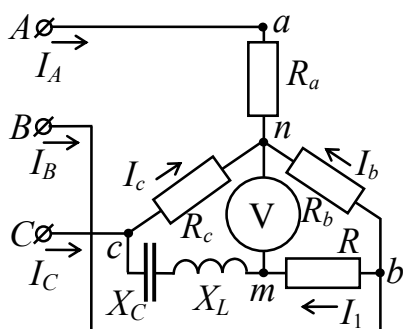
Необходимо:

- определить токи I_A , I_B , I_C , I_a , I_1 , I_b , I_N ;
- определить показание вольтметра.

Задача 27

Сложная цепь подключена к трехпроводной электрической сети. Известно:

- линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$;
- сопротивления $R_a = R_c = R_c = 50 \text{ Ом}$; $R = X_C = X_L = 40 \text{ Ом}$.



Необходимо:

- определить токи I_A , I_B , I_C , I_c , I_b , I_1 ;
- определить показание вольтметра U_{mn} .

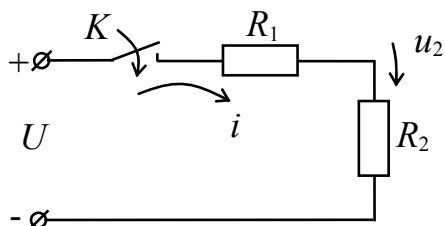
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Задача 1

Дана цепь, которая подключается к источнику постоянного тока при помощи ключа K .

Известно:

- напряжение источника $U = 100 \text{ В}$;
- сопротивление $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 100 \text{ Ом}$;
- считаем $R_{\text{и}}$ источника $R_{\text{и}} = 0$.



Необходимо:

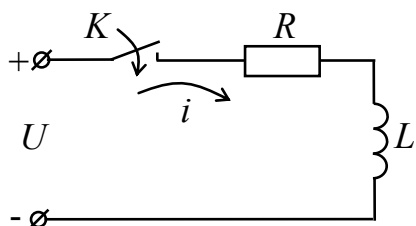
- рассчитать ток i и напряжение u_2 в переходном режиме;
- построить временной график i , u_2 в масштабе.

Задача 2

Дана цепь, которая подключается к источнику постоянного тока при помощи ключа K .

Известно:

- а) напряжение источника $U = 100$ В;
- б) сопротивление $R = 100$ Ом;
- в) индуктивность $L = 4$ Гн;
- г) считаем сопротивление источника $R_{\text{и}} = 0$.



Необходимо:

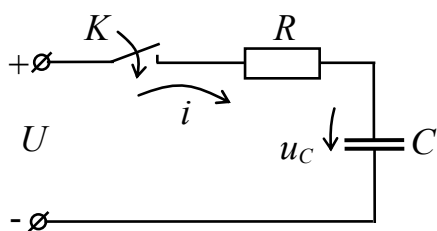
- а) рассчитать ток i и напряжение U_R после окончания переходного процесса;
- б) построить временной график $i(t)$ в масштабе.

Задача 3

Дана цепь, которая подключается к источнику постоянного тока при помощи ключа K .

Известно:

- а) напряжение источника $U = 100$ В;
- б) емкость $C = 100$ мкФ;
- в) сопротивление $R = 100$ Ом;
- г) считаем сопротивление источника $R_{\text{и}} = 0$.



Необходимо:

- а) рассчитать переходный процесс $i(t)$, $U_C(t)$;
- б) построить временные графики $i(t)$ и $u_C(t)$ (в масштабе).

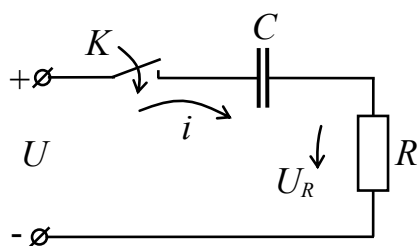
Задача 4

Дана цепь, которая подключается к источнику постоянного тока при помощи ключа K .

Известно:

- а) напряжение источника $U = 120$ В;
- б) емкость $C = 70$ мкФ;
- в) сопротивление $R = 200$ Ом;

г) считаем сопротивление источника $R_{\text{и}} = 0$.



Необходимо:

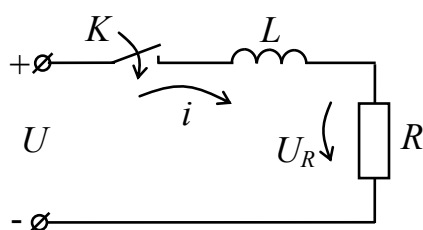
- а) рассчитать переходный процесс $i(t)$ и $U_R(t)$ в пределах $t = 0 - 5\tau$;
- б) построить временные диаграммы $i(t)$ и $U_R(t)$ (в масштабе).

Задача 5

Дана цепь, которая подключается к источнику постоянного тока при помощи ключа K .

Известно:

- а) напряжение источника $U = 150 \text{ В}$;
- б) индуктивность $L = 5 \text{ Гн}$;
- в) сопротивление $R = 300 \text{ Ом}$;
- г) считаем сопротивление источника $R_{\text{и}} = 0$.



Необходимо:

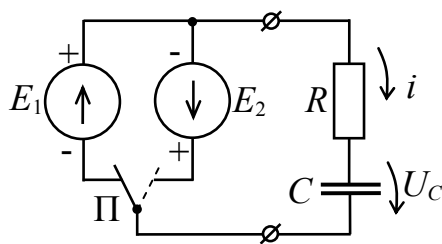
- а) рассчитать переходный процесс $i(t)$ и $U_R(t)$ в пределах $t = 0 - 5\tau$;
- б) построить временные диаграммы $i(t)$ и $U_R(t)$ (в масштабе).

Задача 6

Дана цепь, которая при помощи переключателя Π подключается то к «плюсу», то к «минусу» источника постоянного тока с периодом времени $\pm T = 5\tau$.

Известно:

- а) $E_1 = E_2 = 100 \text{ В}$;
- б) $R_{\text{и}1} = R_{\text{и}2} = 0$ (внутреннее сопротивление источников E_1 и E_2)
- в) сопротивление $R = 200 \text{ Ом}$;
- г) емкость $C = 200 \text{ мкФ}$.



Необходимо:

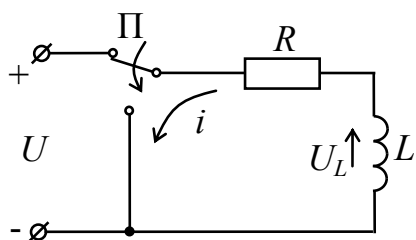
- а) рассчитать переходные процессы $i(t)$ и $U_C(t)$ в пределах $+T = 5\tau$ и $-T = -5\tau$;
- б) построить временные графики $i(t)$ и $U_C(t)$ в масштабе.

Задача 7

Дана цепь $R-L$, работающая на постоянном токе. При помощи переключателя Π она отключается от источника, и вход цепи «закорачивается».

Известно:

- а) напряжение $U = 100$ В;
- б) сопротивление $R = 200$ Ом;
- в) индуктивность $L = 10$ Гн.



Необходимо:

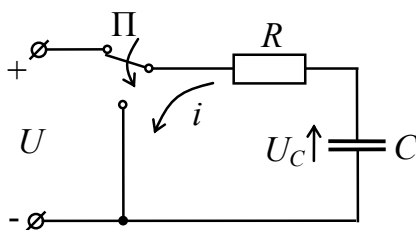
- а) рассчитать переходный режим (процесс) в пределах $t = 5\tau$ – тока i и напряжения U_L ;
- б) построить временные графики $i(t)$ и $U_L(t)$ в масштабе.

Задача 8

Дана цепь $R-C$, работающая на постоянном токе. При помощи переключателя Π она отключается от источника, и вход цепи «закорачивается».

Известно:

- а) напряжение $U = 150$ В;
- б) сопротивление $R = 300$ Ом;
- в) емкость $C = 100$ мкФ.



Необходимо:

- а) рассчитать переходный процесс $i(t)$ и $U_C(t)$;
- б) построить временные графики $i(t)$ и $U_C(t)$ в масштабе.

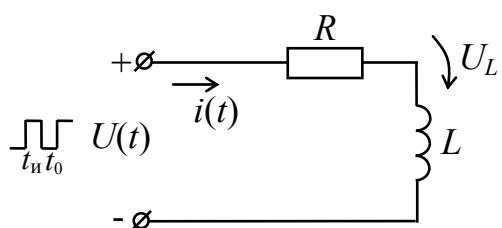
Задача 9

Цепь $R-L$ питается от источника прерывистого напряжения $U = 0$ и $U = 20$ В. При этом время паузы равно времени наличия напряжения, т. е. $t_0 = t_{\text{и}}$.

Известно:

- а) сопротивление $R = 20$ Ом;
- б) индуктивность $L = 40$ Гн;
- в) $t_0 = t_{\text{и}} = 10$ с;

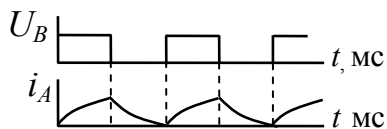
г) внутреннее сопротивление генератора всегда $r_{\Gamma} = 0$.



Необходимо:

а) рассчитать переходный процесс тока $i(t)$;

б) построить временные графики $U(t)$ и $i(t)$ в масштабе.



Задача 10

Цепь R – C питается от источника прерывистого напряжения $U = 0$ и $U = 30$ В. При этом время паузы (отсутствия напряжения) равно времени наличия напряжения, т. е. $t_0 = t_{\text{и}}$.

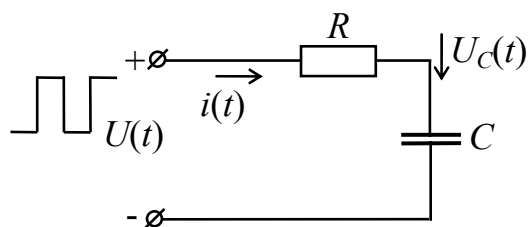
Известно:

а) сопротивление $R = 10$ кОм;

б) емкость $C = 100$ мкФ;

в) $t_0 = t_{\text{и}} = 10$ с;

г) внутреннее сопротивление генератора всегда $r_{\Gamma} = 0$.



Необходимо:

а) рассчитать переходный процесс $i(t)$ и напряжения $U_C(t)$;

б) построить в масштабе временные графики $U(t)$, $i(t)$ и $U_C(t)$.

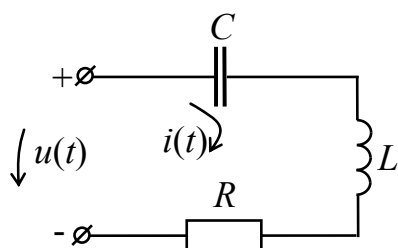
ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Задача 1

Дана линейная электрическая цепь, к которой приложено несинусоидальное напряжение $u(t)$.

Известно:

- а) приложено к цепи $u(t) = 200 + 282 \sin \omega t$;
- б) частота источника $f = 50$ Гц;
- в) сопротивления $X_C = X_L = 60$ Ом; $R = 40$ Ом.



Необходимо:

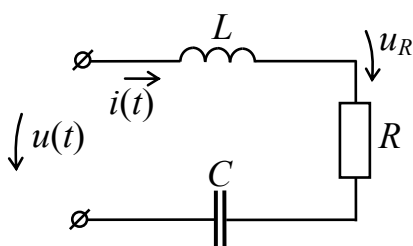
- а) определить действующее значение тока I ;
- б) определить действующее значение U_R ;
- в) построить в масштабе ток $i(t)$.

Задача 2

Дана линейная электрическая цепь, к которой приложено несинусоидальное напряжение $u(t)$.

Известно:

- а) приложено напряжение $u(t) = 200 + 141 \sin \omega t$;
- б) частота сети $f = 50$ Гц;
- в) индуктивность $L = 0,191$ Гн;
- г) емкость $C = 53$ мкФ;
- д) резистор сопротивлением $R = 50$ Ом.



Необходимо:

- а) определить действующее значение тока I ;
- б) построить в масштабе напряжение U_R .

Задача 3

Дана линейная электрическая цепь, состоящая из двух ветвей, содержащих X_L и R_1 в первой ветви, X_C и R_2 во второй ветви, соединенных параллельно. Питается цепь несинусоидальным напряжением $u(t)$.

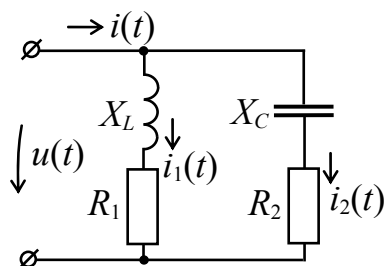
Известно:

а) напряжение $u(t) = 100 + 141 \sin \omega t$;

б) частота источника $f = 50$ Гц;

в) $X_L = \omega L = 10$ Ом; $R_1 = 20$ Ом; $X_C = \frac{1}{\omega C} = 40$ Ом; $R_2 = 20$ Ом;

г) считаем $R_{\text{и}} = 0$ (внутреннее сопротивление).



Необходимо:

а) определить токи $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$;

б) построить в масштабе токи $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$.

Задача 4

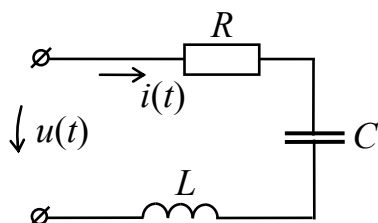
К цепи линейной, состоящей из элементов L – C – R , приложено несинусоидальное напряжение $u(t)$.

Известно:

а) напряжение $u(t) = 30 + 50 \sin \omega t$;

б) частота источника $f = 500$ Гц;

в) $R = 100$ Ом; $L = 0,2$ Гн; $C = 0,5$ мкФ.



Необходимо: а) определить ток $i(t)$ и построить его временный график;

б) определить активную мощность цепи P .

Задача 5

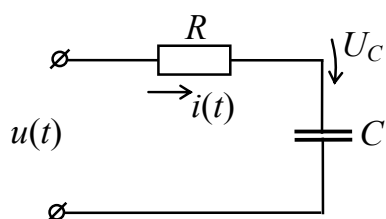
Дана линейная электрическая цепь, которая питается несинусоидальным напряжением.

Известно:

а) напряжение $u(t) = 20 + 30 \sin \omega t$;

б) частота источника $f = 1000$ Гц;

в) $R = 200$ Ом; $C = 2 \cdot 10^{-6}$ мкФ.



Необходимо:

а) определить ток $i(t)$;

б) определить активную мощность P ;

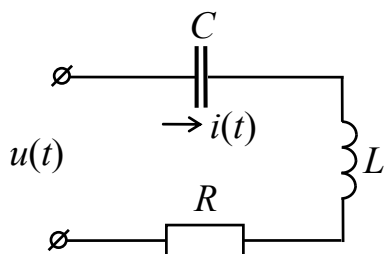
в) построить временную диаграмму изменения u_C .

Задача 6

Линейная электрическая цепь питается несинусоидальным напряжением $u(t) = 100 + 141 \sin \omega t$.

Известно: а) частота тока $f = 100$ Гц;

б) $C = 20$ мкФ; $L = 0,1$ Гн; $R = 30$ Ом.



Необходимо:

а) определить действующее значение тока I ;

б) построить временную диаграмму напряжения U_R .

Задача 7

Линейная электрическая цепь подключена к несинусоидальному источнику питания.

Известно:

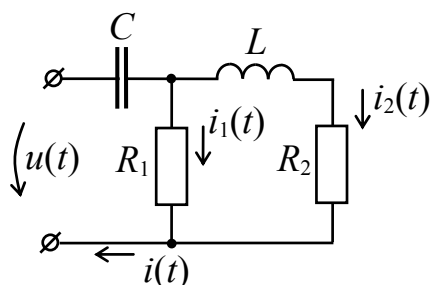
а) напряжение $u(t) = 80 + 141 \sin \omega t$;

б) частота тока $f = 150$ Гц;

в) емкость $C = 10$ мкФ;

г) индуктивность $L = 0,5$ Гн;

д) сопротивления $R_1 = 20$ Ом; $R_2 = 15$ Ом.



Необходимо:

а) построить в масштабе временные графики токов $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$;

б) определить активную мощность цепи $P = P_1 + P_2$.

Задача 8

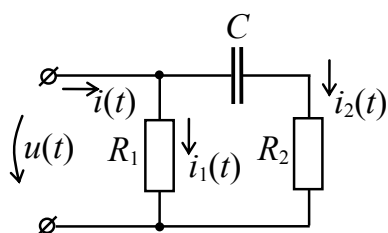
Дана линейная электрическая цепь, которая подключена к источнику несинусоидального напряжения $u(t) = 20 + 14,1 \sin \omega t$.

Известно:

а) емкость $C = 10$ мкФ;

б) частота тока $f = 1000$ Гц;

в) сопротивление резисторов $R_1 = R_2 = 20$ Ом.



Необходимо:

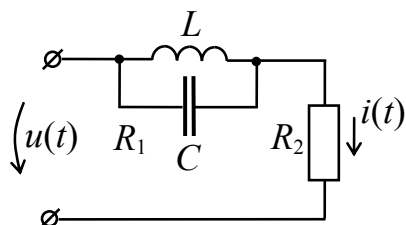
- построить в масштабе временные графики токов $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$;
- определить активную мощность цепи, т. е. $P = P_1 + P_2$.

Задача 9

Линейная электрическая цепь подключена к источнику с напряжением несинусоидальным, описываемым уравнением $u(t) = 50 \sin 2\pi 20t + 100 \sin 2\pi 200t$.

Известно:

- индуктивность $L = 0,1$ Гн;
- емкость $C = 6,6 \cdot 10^{-6}$ Ф;
- резистор $R = 10$ Ом.



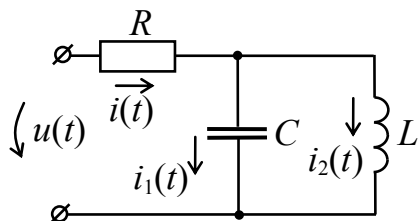
Необходимо: а) построить в масштабе временной график тока $i(t)$ в цепи.

Задача 10

Дана линейная электрическая цепь $R-L-C$. К цепи подключено несинусоидальное напряжение $u(t) = 80 \sin \omega_1 t + 120 \sin \omega_2 t$.

Известно:

- $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi 500$;
- $\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi 100$;
- индуктивность $R = 20$ Ом;
- $L = 0,2$ Гн;
- $C = 0,5$ мкФ.



Необходимо:

- рассчитать и построить в масштабе временной график тока $i(t)$ через резистор R ;
- определить активную мощность P .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1978.
2. Электротехника / под ред. И. А. Федоровой. – Минск : Выш. шк., 1977.
3. Попов, В. С. Общая электротехника с основами электроники / В. С. Попов, С. А. Николаев. – М. : Энергия, 1977.
4. Электротехника / под общ. ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1983.
5. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л. : Энергоиздат, 1981.
6. Общая электротехника / под ред. А. Т. Блажкина. – М. : Энергия, 1979.
7. Борисов, Ю. М. Электротехника / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – М. : Энергия, 1985.
8. Иванов, И. И. Электротехника / И. И. Иванов, В. С. Равдоник. – М. : Высш. шк., 1984.
9. Касаткин, А. С. Электротехника / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Энергия, 1983.

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Чубриков Леонид Гаврилович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Учебное пособие

Электронный аналог печатного издания

Редактор

Н. В. Гладкова

Компьютерная верстка

Н. Б. Козловская

Подписано в печать 27.11.14.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 15,58. Уч.-изд. л. 10,93.

Изд. № 102.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение

Гомельский государственный

технический университет имени П. О. Сухого.

Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя

печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48